

UTILITÁRIO DE APOIO À ESTIMAÇÃO DE PARÂMETROS NA ESCAVAÇÃO DE TÚNEIS

Alberto Jorge Fernandes da Silva

Dissertação submetida para satisfação dos requisitos do grau de

MESTRE EM ENGENHARIA DE MINAS E GEO-AMBIENTE

Orientador: Professor Doutor Alexandre Júlio Machado Leite

Co-orientador: José Cardoso Guedes

Júri: José Manuel Soutelo Soeiro de Carvalho

Arguente: João Paulo Meixedo

JUNHO DE 2014

Mestrado em Engenharia de Minas e Geo-ambiente 2013/2014

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS

Tel. +351 225 081 960

Editado por

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 Porto

Portugal

Tel. +351 22 508 1400

Fax +351 22 508 1140

E-mail feup@fe.up.pt

Website <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a Mestrado em Engenharia de Minas e Geo-ambiente – 2013/2014 – Departamento de Engenharia de Minas e Geo-ambiente, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2014.

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respectivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir da versão electrónica fornecida pelo respectivo Autor.

Aos meus Pais,

Pelas suas Batalhas e Sacrifícios

Para a minha Educação e Crescimento

Resumo

Os túneis, como estrutura, acompanham o Homem há muitas décadas, evoluindo graças ao constante estudo e à introdução de novas tecnologias. A construção destas estruturas, à medida que se tornaram e tornam cada vez mais complexas, exigem um extensivo estudo, análise e reflexão, previamente ao início da sua construção e escavação. Nesta fase, várias estimativas e previsões são realizadas, levando em conta um variado número de parâmetros, não só do projecto como geológicos.

Nesta fase de previsão e estimativa, será focada esta dissertação, estudando-se as principais operações, constituintes de um projecto de escavação de túnel, bem como diversos parâmetros que são passíveis de o influenciar.

Com este estudo, pretende-se contribuir, através da construção de uma utilitário informática em Matlab, para a estimativa de diversos parâmetros presentes nos projectos de escavação de túneis, tendo em vista poder ser utilizado em processos de optimização desses mesmos projectos

Palavras-Chave:

Ciclo de trabalho, Duração temporal, Estimativa, Previsão, Túneis, Software

Abstract

The tunnel, as structure, accompanying the Man for several decades, evolving through the constantly study and the introduction of new technologies. The construction of these structures, as they become more complex, demands an extensive study, analysis and reflection, before the begin of the construction. In this stage, several estimations and predications are performed, taking in consideration a large number of parameters, from the project and geologic.

It's in this prediction phase that this thesis will focus, studying the main operations, that form one opening tunnel's project.

This study will form a solid and stable base, that will support the creation of a software, in Matlab, that will allow the estimation of time duration and other parameters from a project, taking always in consideration the project characteristics and the background study.

Keywords

Work cycle, Temporal duration, Estimation, Prediction, Tunnel, Software,

Índice Geral

1. INTRODUÇÃO	15
1.1 ENQUADRAMENTO E OBJECTIVOS.....	15
1.2 METODOLOGIA.....	16
1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	16
2. ENQUADRAMENTO HISTÓRICO	19
3. INVESTIGAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DE MACIÇOS ROCHOSOS.....	23
3.1 INTRODUÇÃO	23
3.2 INVESTIGAÇÃO DE MACIÇOS ROCHOSOS	23
3.2.1 Geologia	24
3.2.2 Hidrologia e Hidrogeologia.....	25
3.2.3 Métodos Não-intrusivos.....	25
3.2.4 Métodos Intrusivos	26
3.2.4.1 Ensaio <i>in-situ</i>	26
3.2.4.2 Amostragem	27
3.2.5 Ensaios Laboratoriais.....	28
3.3 CLASSIFICAÇÃO DE MACIÇOS ROCHOSOS.....	29
3.3.1 Classificação Geológica	29
3.3.2 Classificações Geomecânicas	30
3.3.2.1 RQD.....	30
3.3.2.2 Rock Mass Rating	31
3.3.2.3 Rock Tunneling Quality Index.....	37
3.3.3 Relação entre o RMR e o Índice Q.....	40
3.4 ESCAVABILIDADE	41
3.4.1 Critérios de escavabilidade por Kirsten.....	41
3.4.2 Critérios de escavabilidade por Franklin	42
3.5 EMPOLAMENTO	44
3.6 CONCLUSÃO	46
4. METODOLOGIAS DE ESCAVAÇÃO DE TÚNEIS	47
4.1 INTRODUÇÃO	47
4.2 ESCAVAÇÃO DE TÚNEIS COM O USO DE EXPLOSIVOS	49
4.3 ESCAVAÇÃO MECÂNICA	51

4.3.1	Por tuneladoras	51
4.3.2	Por equipamentos de “ataque pontual”	52
4.4	ABORDAGENS NA ESCAVAÇÃO DE UM TÚNEL.....	52
4.4.1	Desmonte por secção plena	53
4.4.2	Abóboda e Soleira	53
4.4.3	Abertura de um túnel piloto	54
4.5	CONCLUSÃO	55
5.	DIAGRAMA DE PEGA DE FOGO	57
5.1	INTRODUÇÃO	57
5.2	CONSTRUÇÃO DE UM DIAGRAMA DE FOGO	61
5.2.1	Número de Furos.....	61
5.2.2	Comprimento da Pega de Fogo.....	62
5.2.3	Avanço Real	62
5.2.4	Cálculo dos diferentes furos.....	65
5.3	EXPLOSIVOS.....	66
5.3.1	Propriedades Explosivo	68
5.3.2	Principais explosivos existentes	69
5.3.2.1	Explosivos gelatinosos	70
5.3.2.2	ANFO	70
5.3.2.3	ANFO Pesado	71
5.3.2.4	Emulsão	72
5.3.3	Factores de escolha de explosivos	72
5.4	DETONADORES.....	73
5.4.1	Detonadores eléctricos	73
5.4.2	Detonadores não-eléctricos	74
5.4.3	Detonadores electrónicos	76
5.5	BOOSTER	76
5.6	CONCLUSÃO	77
6.	CICLO DE TRABALHO NA ESCAVAÇÃO DE UM TÚNEL	79
6.1	INTRODUÇÃO	79
6.2	OPERAÇÃO DE MARCAÇÃO DA PEGA DE FOGO.....	83
6.3	OPERAÇÃO DE CHEGADA DO JUMBO À FRENTE.....	85
6.4	OPERAÇÃO DE PERFURAÇÃO	88

6.4.1	Equipamentos e Regras de Perfuração	88
6.4.1.1	Jumbos de Perfuração	88
6.4.1.2	Martelos	90
6.4.1.3	Bits de perfuração	95
6.4.1.1	Hastes	98
6.4.1.2	Durabilidade do Aço de Perfuração	99
6.4.1.3	Regras Básicas	100
6.4.2	Determinação do Tempo de Operação de Perfuração	101
6.5	OPERAÇÃO DE CARREGAMENTO DA PEGA DE FOGO	104
6.6	OPERAÇÃO DE LIGAÇÃO DA PEGA DE FOGO.....	109
6.7	OPERAÇÃO DE SAÍDA DOS OPERADORES E DISPARO DA PEGA DE FOGO	113
6.7.1	Saída dos Operadores	113
6.7.1	Detonação da Pega de Fogo.....	114
6.8	OPERAÇÃO DE VENTILAÇÃO.....	116
6.1	OPERAÇÃO DE SANEAMENTO	121
6.2	OPERAÇÃO DE REMOÇÃO DO ESCOMBRO	124
6.2.1	Actividade Carga.....	126
6.2.1.1	Equipamentos de carga	126
6.2.1.2	Ciclo Elementar de um Equipamento de Carga.....	128
6.2.1.3	Duração da Actividade de Carga	133
6.2.1	Actividade de Transporte	136
6.2.1.1	Equipamentos de Transporte	136
6.2.1.2	Ciclo Elementar de Transporte	137
6.2.1.3	Viagens dos equipamentos de transporte: abordagem científica	141
6.2.1.4	Duração da Actividade de Transporte.....	146
6.2.2	Nichos: influência na Operação de Remoção do escombros	151
6.2.2.1	Determinação temporal das Operações de Remoção utilizando Nichos..	154
6.2.2.1.1	Operação de Limpeza da Frente	155
6.2.2.1.1	Operação de Limpeza do Nicho	159
6.3	DURAÇÃO DE UM CICLO DE TRABALHO.....	163
6.3.1	Duração de Um Ciclo de Trabalho Sem a Utilização de Nichos.....	163
6.3.2	Duração de um Ciclo de Trabalho com a Utilização de Nichos	169
7.	DURAÇÃO DE UM PROJECTO	177

8. UTILITÁRIO INFORMÁTICO	183
8.1 INPUTS.....	184
8.2 PROCESSO.....	187
8.2.1 Processo Auxiliar	188
8.2.2 Processo Estimação Temporal	192
8.2.2.1 Tempo Chegada do Jumbo à Frente.....	192
8.2.2.2 Tempo Marcação da Pega de Fogo	192
8.2.2.3 Tempo Perfuração	193
8.2.2.4 Tempo Carregamento da Pega de Fogo	194
8.2.2.5 Tempo Ligação da Pega de Fogo	196
8.2.2.6 Tempo Saída dos Operadores e Disparo da Pega de Fogo.....	196
8.2.2.7 Tempo Ventilação.....	197
8.2.2.8 Tempo Saneamento	197
8.2.2.9 Tempo Carga	198
8.2.2.10 Tempo Transporte	199
8.2.2.11 Tempo de Limpeza da Frente	201
8.2.2.12 Tempo de Limpeza do Nicho	203
8.2.2.12.1 Tempo de Carga do Nicho.....	203
8.2.2.12.2 Tempo de Transporte do Nicho	203
8.2.2.13 Tempo Total Projecto	206
8.2.3 Processo Distâncias Percorridas.....	208
8.2.4 Processo Aço Perfuração.....	209
8.2.5 Processo Avaliação Projecto	210
8.3 OUTPUTS	212
8.4 Exemplos Práticos	214
8.4.1 Exemplo Prático 1.....	214
8.4.2 Exemplo Prático 2.....	217
9. CONCLUSÃO E PERSPECTIVAS FUTURAS	219
9.1 CONCLUSÕES.....	219
9.2 PERSPECTIVAS FUTURAS	220
10. BIBLIOGRAFIA.....	223
ANEXOS.....	225

Índice de Figuras

FIGURA 1 – INTERIOR DE UM AQUEDUTO ROMANO, QUE LIGA AS PISCINAS DE SALOMÃO A JERUSALÉM	19
FIGURA 2 – TRABALHOS DE ESCAVAÇÃO DE UM TÚNEL EM SAUDERTON, EM 1902	20
FIGURA 3 – REPRESENTAÇÃO DO EUROTÚNEL, LIGANDO A INGLATERRA A FRANÇA	21
FIGURA 4 – TRABALHOS DE CONSTRUÇÃO DO EUROTÚNEL	21
FIGURA 5 – ENTRADA DO TÚNEL LAERDAL, COM A INFORMAÇÃO DA SUA EXTENSÃO	22
FIGURA 6 – UMA DAS CAVERNAS DE PARAGEM DO TÚNEL LAERDAL.....	22
FIGURA 7 – EXEMPLO DE COROAS DE PERFURAÇÃO, PARA AMOSTRAGEM, DA ATLAS COPCO	28
FIGURA 8 – EXEMPLIFICAÇÃO DE UM ENSAIO RQD E DA SUA QUANTIFICAÇÃO PRÉVIA ³¹	
FIGURA 9 – REPRESENTAÇÃO DAS POSSÍVEIS RELAÇÕES ENTRE A ORIENTAÇÃO DAS DESCONTINUIDADES E A DIRECÇÃO DE ESCAVAÇÃO DE UM TÚNEL	35
FIGURA 10 – CLASSES SEGUNDO O ÍNDICE Q, APRESENTADO POR BARTON (GRIMSTAD E BARTON, 1993)	39
FIGURA 11 – RELAÇÃO ENTRE A ESCAVABILIDADE E SEUS PARÂMETROS, SEGUNDO FRANKLIN, E OS MÉTODOS DE DESMONTE DE UM MACIÇO ROCHOSO (FRANKLIN ET AL, 1971)	43
FIGURA 12 – RELAÇÃO ENTRE OS MÉTODOS DE ESCAVAÇÃO DE TÚNEIS E O VALOR DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO UNIAXIAL DO MACIÇO ROCHOSO.....	48
FIGURA 13 – RELAÇÃO ENTRE OS MÉTODOS DE ESCAVAÇÃO DE TÚNEIS, O VALOR DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO UNIAXIAL E O ESTADO DE FRACTURAÇÃO/ESTABILIDADE	48
FIGURA 14 – EQUIPAMENTO DE PERFURAÇÃO REALIZANDO A SUA OPERAÇÃO, NUM TÚNEL ABERTO PELO MÉTODO PERFURAÇÃO E DETONAÇÃO.....	50
FIGURA 15 – SEQUÊNCIA DE TRABALHOS REALIZADOS NA ESCAVAÇÃO DE UM TÚNEL, PELO MÉTODO DE PERFURAÇÃO E DETONAÇÃO (LOPÉZ JIMENO, 2003).....	50
FIGURA 16 – DUAS PERSPECTIVAS DOS EQUIPAMENTOS TBM (TUNELADORAS)	51
FIGURA 17 – DUAS PERSPECTIVAS DAS MÁQUINAS DE ATAQUE PONTUAL: 1º EQUIPAMENTO DA SANDVIK; 2º BRAÇO DO EQUIPAMENTO DESMONTANDO MATERIAL ROCHOSO.....	52
FIGURA 18 – ESQUEMA DE AVANÇO DE UM TÚNEL PELO DESMONTE POR SECÇÃO PLENA (BHANDARI. 1997) .	53
FIGURA 19 – ESQUEMA DA FRENTE DE UM TÚNEL, PELO ABORDAGEM ABÓBODA E SOLEIRA.....	54
FIGURA 20 – SEQUÊNCIA DE TRABALHOS, NA ESCAVAÇÃO DE UM TÚNEL POR TÚNEL PILOTO.....	54
FIGURA 21 – EXEMPLO DE UM DIAGRAMA DE FOGO, PARA A ESCAVAÇÃO DE UM TÚNEL	57
FIGURA 22 – FRENTE DE DESMONTE DE UM TÚNEL, REPRESENTANDO OS DIFERENTES GRUPOS DE FUROS	58
FIGURA 23 – DIFERENTES PERSPECTIVAS DE UMA PEGA DE FOGO COM UMA CALDEIRA POR FUROS PARALELOS	59
FIGURA 24 - DIFERENTES PERSPECTIVAS DE UMA PEGA DE FOGO COM CALDEIRA POR FUROS EM LEQUE	59
FIGURA 25 - DIFERENTES PERSPECTIVAS DE UMA PEGA DE FOGO COM CALDEIRA POR FUROS EM V	60
FIGURA 26 – RELAÇÃO ENTRE O AVANÇO REAL E O COMPRIMENTO TOTAL PERFURADO.....	62
FIGURA 27 – PERFIL ESQUEMÁTICO DE UM FURO, UTILIZADO NO MÉTODO DE PERFURAÇÃO E DETONAÇÃO, VISUALIZANDO-SE AS ESTRUTURAS: A-TAMPÃO, B-COLUNA E C-FUNDO. A VERMELHO ESTÁ REPRESENTADA A LOCALIZAÇÃO DO DETONADOR.	67
FIGURA 28 – EXPLOSIVO ANFO, COMERCIALIZADO PELA MAXAM	71
FIGURA 29 – DETONADORES ELÉCTRICOS, COMERCIALIZADOS PELA MAXAM.....	74
FIGURA 30 – DETONADORES NÃO-ELÉCTRICOS, COMERCIALIZADOS PELA MAXAM	75
FIGURA 31 – RETARDOS, COMERCIALIZADOS PELA MAXAM	75
FIGURA 32 – BOOSTERS, COMERCIALIZADOS PELA MAXAM.....	76
FIGURA 33 – REPRESENTAÇÃO DE UMA DAS POSSÍVEIS CONSTITUIÇÕES E ORGANIZAÇÕES DE UM CICLO DE TRABALHO DE ESCAVAÇÃO DE UM TÚNEL, PELO MÉTODO DE PERFURAÇÃO E DETONAÇÃO	80

FIGURA 34 – SEQUÊNCIA DE TRABALHOS, NA MARCAÇÃO DE UMA PEGA DE FOGO MANUALMENTE	83
FIGURA 35 – <i>SOFTWARE</i> DE MARCAÇÃO AUTOMÁTICA: TCAD DA SANDVIK.....	84
FIGURA 36 – EXEMPLO DE UM JUMBO DE PERFURAÇÃO, COMERCIALIZADO PELA ATLAS COPCO	88
FIGURA 37 – ESQUEMA DE UM BRAÇO DE UM JUMBO DE PERFURAÇÃO	90
FIGURA 38 - VARIAÇÃO DA VELOCIDADE DE PENETRAÇÃO, EM FUNÇÃO DO DIÂMETRO DO FURO, PARA MARTELOS DE 12kW (ATLAS COPCO, 2010)	92
FIGURA 39 – VARIAÇÃO DA VELOCIDADE DE PENETRAÇÃO, EM FUNÇÃO DO DIÂMETRO DO FURO, PARA MARTELOS DE 16kW (ATLAS COPCO, 2010)	93
FIGURA 40 – VARIAÇÃO DA VELOCIDADE DE PENETRAÇÃO, EM FUNÇÃO DO DIÂMETRO DO FURO, PARA MARTELOS DE 18kW (ATLAS COPCO, 2010)	93
FIGURA 41 – EXEMPLO DE ALGUNS BITS DE PERFURAÇÃO COMERCIALIZADOS PELA ATLAS COPCO: A- NORMAL; B- CÔNCAVO; C- HEAVY DUTY; D- RETRAC E E- INSERÇÃO (ATLAS COPCO, 2008)	96
FIGURA 42 – RELAÇÃO ENTRE O DESIGN DO BIT DE PERFURAÇÃO E A DUREZA DO MATERIAL ROCHOSO, SEGUNDO A ATLAS COPCO (ATLAS COPCO, 2008)	97
FIGURA 43 – HASTES DE PERFURAÇÃO E AS SUAS DIFERENTES CONEXÕES	98
FIGURA 44 – AÇO DE PERFURAÇÃO: PRINCÍPIAS INSTRUMENTOS CONSTITUINTES (LÓPEZ JIMENO, 2003).....	99
FIGURA 45 – TRABALHOS DE LIGAÇÃO DOS EXPLOSIVOS, NA FRENTE DE DESMONTE DE UM TÚNEL.....	109
FIGURA 46 – ESQUEMA DE UMA LIGAÇÃO, DE DETONADORES ELÉCTRICOS, EM SÉRIE	110
FIGURA 47 – ESQUEMA DE UM CIRCUITO, DE DETONADORES ELÉCTRICOS, EM PARALELO	110
FIGURA 48 – ESQUEMA DE UMA FRENTE DE DESMONTE DE UM TÚNEL, COM A LIGAÇÃO DE DETONADORES NÃO-ELÉCTRICOS.....	111
FIGURA 49 – MANGAS DE VENTILAÇÃO PARA TRABALHOS SUBTERRÂNEOS	118
FIGURA 50 – ESQUEMATIZAÇÃO DA VENTILAÇÃO INSUFLANTE DE UM TÚNEL)	118
FIGURA 51 – ESQUEMATIZAÇÃO DA VENTILAÇÃO ASPIRANTE DE UM TÚNEL (LÓPEZ JIMENO, 2003)	119
FIGURA 52 – ESQUEMATIZAÇÃO DA VENTILAÇÃO SIMULTÂNEA DE UM TÚNEL	119
FIGURA 53 – INSTRUMENTOS MANUAIS DE SANEAMENTO	122
FIGURA 54 – EQUIPAMENTOS DE SANEAMENTO, SCALETEC LC, DA ATLAS COPCO	122
FIGURA 55 – LOAD HAUL DUMP: SCOOPTRAM ST1530 DA ATLAS COPCO	127
FIGURA 56 – PÁ-CARREGADORA: 972H DA CAT	127
FIGURA 57 – CAMIÃO SUBTERRÂNEO: MINETRUCK MT6020 DA ATLAS COPCO	136
FIGURA 58 – ESQUEMATIZAÇÃO DE UM CICLO ELEMENTAR DE UMA UNIDADE DE TRANSPORTE	138
FIGURA 59 – ORGANIZAÇÃO DOS TRABALHOS, NO CASO DE AS OPERAÇÕES DE LIMPEZA DA FRENTE E DO NICHOSEREM REALIZADAS EM SEQUÊNCIA	153
FIGURA 60 – CONJUNTO DE TRABALHOS, NAS SITUAÇÕES EM QUE OCORRE A SOBREPOSIÇÃO TEMPORAL DAS OPERAÇÕES DE LIMPEZA DA FRENTE E LIMPEZA DO NICHOS.....	154
FIGURA 61 - <i>LAYOUT</i> DO UTILITÁRIO INFORMÁTICO CRIADO EM CONDORDÂNCIA COM ESTA DISSERTAÇÃO DESIGNADO POR: ESTIMATION TOOL FOR TUNNELING.....	213
FIGURA 62.A – GRUPO DE <i>INPUTS</i> UTILIZADOS PARA A DURAÇÃO ESTIMADA DO PROJECTO SER DE 8 MESES..	215
FIGURA 63.B - GRUPO DE <i>INPUTS</i> UTILIZADOS PARA A DURAÇÃO ESTIMADA DO PROJECTO SER DE 1 ANO	215
FIGURA 64 – AVALIAÇÃO DO PROJECTO, NAS CONDIÇÕES DO EXEMPLO 1, PARA O DIA 30 DE TRABALHO	216
FIGURA 65 – APRESENTAÇÃO DO <i>INPUT</i> “NICHOS” E DO <i>OUTPUT</i> “DURAÇÃO DO PROJECTO” PARA OS DIFERENTES CASOS: A- UTILIZANDO EQUIPAMENTOS EXTRA E B- NÃO UTILIZANDO EQUIPAMENTOS EXTRA	217
FIGURA 66 – <i>SOFTWARE</i> , PREENCHIDO COM OS <i>INPUTS</i> REFERENTES AO EXEMPLO PRÁTICO 1, PARA A OBTENÇÃO DE UMA DURAÇÃO DO PROJECTO DE 12 MESES	229

Utilitário de Apoio à Estimação de Parâmetros na Escavação de Túneis

FIGURA 67 – SOFTWARE, PREENCHIDO COM OS INPUTS REFERENTES AO EXEMPLO PRÁTICO 1, PARA A OBTENÇÃO DE UMA DURAÇÃO DO PROJECTO DE 8 MESES, TAL COMO OS RESULTADOS DA AVALIAÇÃO DO PROJECTO PARA 30 DIAS DE TRABALHO	230
FIGURA 68 – ESTIMAÇÃO PARA UM PROJECTO, EM QUE SÃO UTILIZADOS NICHOS, PORÉM NÃO SÃO UTILIZADOS EQUIPAMENTOS DE CARGA EXTRA	231
FIGURA 69 – ESTIMAÇÃO PARA UM PROJECTO, EM QUE SÃO UTILIZADOS NICHOS E EQUIPAMENTOS DE CARGA EXTRA	232

Índice de Tabelas

TABELA 1 – EXEMPLO DE ALGUNS ENSAIOS <i>IN-SITU</i> E DOS PARÂMETROS PASSÍVEIS DE SEREM ADQUIRIDOS	27
TABELA 2 – TIPOS DE AMOSTRAS E AS SUAS CARACTERÍSTICAS	27
TABELA 3 – PRINCIPAIS ENSAIOS LABORATORIAIS: CARACTERÍSTICAS E INFORMAÇÕES OBTIDAS	29
TABELA 4 – CLASSIFICAÇÃO DA RESISTÊNCIA DA ROCHA ÍNTEGRA, SEGUNDO O RMR, PARA UM MACIÇO ROCHOSO	32
TABELA 5 – CLASSIFICAÇÃO DO RQD, SEGUNDO O RMR, PARA UM MACIÇO ROCHOSO	33
TABELA 6 – CLASSIFICAÇÃO DO ESPAÇAMENTO DAS DESCONTINUIDADES, SEGUNDO O RMR, PARA UM MACIÇO ROCHOSO	33
TABELA 7 – CLASSIFICAÇÃO DA CONDIÇÃO DAS DESCONTINUIDADES, SEGUNDO O RMR, PARA UM MACIÇO ROCHOSO, CASO A INFORMAÇÃO SEJA REDUZIDA	33
TABELA 8 – CLASSIFICAÇÃO DA CONDIÇÃO DAS DESCONTINUIDADES, SEGUNDO O RMR, PARA UM MACIÇO ROCHOSO, CASO A INFORMAÇÃO SEJA VASTA	34
TABELA 9 – CLASSIFICAÇÃO DA PRESENÇA DE ÁGUA, SEGUNDO O RMR, PARA UM MACIÇO ROCHOSO	34
TABELA 10 – CLASSIFICAÇÃO DA ORIENTAÇÃO DAS DESCONTINUIDADES, SEGUNDO O RMR, PARA UM MACIÇO ROCHOSO	36
TABELA 11 – CLASSIFICAÇÃO RMR: CLASSES, DESCRIÇÃO, TEMPO MÉDIO DE SUSTENTAÇÃO, COESÃO E ÂNGULO DE ATRITO	36
TABELA 12 – RELAÇÃO ENTRE O ESR E O TIPO DE ESCAVAÇÃO A SER REALIZADA	38
TABELA 13 – RELAÇÕES, APRESENTADAS POR VÁRIOS AUTORES, ENTRE O RMR E O ÍNDICE Q	40
TABELA 14 – PRINCIPAIS CRITÉRIOS DE ESCAVABILIDADE E OS PARÂMETROS EM QUE SE BASEIAM	41
TABELA 15 – RELAÇÃO ENTRE O ÍNDICE DE ESCAVABILIDADE, SEGUNDO KIRSTEN, E AS CARACTERÍSTICAS DE ARRANQUE (DESMONTE) DE UM MATERIAL ROCHOSO	42
TABELA 16 – VALORES DO EMPOLAMENTO DE DIFERENTES MATERIAIS ROCHOSOS, POR LÓPEZ JIMENO (2003)	45
TABELA 17 – RELAÇÃO ENTRE AS CLASSES RMR E A PERCENTAGEM DE AVANÇO	63
TABELA 18 – EXPLOSIVOS GELATINOSOS: VANTAGENS E DESVANTAGENS	70
TABELA 19 – EMULSÃO: VANTAGENS E DESVANTAGENS	72
TABELA 20 – INFLUÊNCIA DAS PRINCIPAIS OPERAÇÕES NA DURAÇÃO DE UM CICLO DE TRABALHO, SEGUNDO LÓPEZ JIMENO (2003)	81
TABELA 21 – COMPARAÇÃO ENTRE OS SISTEMAS PNEUMÁTICO E HIDRÁULICO, DE PERFURAÇÃO	91
TABELA 22 – VELOCIDADES DE PERFURAÇÃO EM FUNÇÃO DA DUREZA DA ROCHA E POTÊNCIA DO MARTELO	95
TABELA 23 – RELAÇÃO ENTRE O TIPO DE DETONADORES A SER UTILIZADOS E A VELOCIDADE DA OPERAÇÃO DE LIGAÇÃO	112
TABELA 24 – RELAÇÃO ENTRE O NÚMERO DE CICLOS DE TRABALHO DE UM PROJECTO E O ÍNDICE <i>i</i>	144
TABELA 25 – RELAÇÃO ENTRE O NÚMERO DE CICLOS DE TRABALHO REFERENTES A UM ÚNICO NÍVEL E O ÍNDICE <i>j</i>	156
TABELA 26 – RELAÇÃO ENTRE O NÚMERO DE NÍVEIS, AO LONGO DE TODO O TÚNEL E O ÍNDICE <i>k</i>	160
TABELA 27 – CLASSIFICAÇÃO DAS OPERAÇÕES QUANDO O JUMBO POSSUI SOFTWARE DE MARCAÇÃO AUTOMÁTICA	164
TABELA 28 – CLASSIFICAÇÃO DAS OPERAÇÕES QUANDO O JUMBO NÃO POSSUI SOFTWARE DE MARCAÇÃO AUTOMÁTICA	164
TABELA 29 – CLASSIFICAÇÃO DAS OPERAÇÕES QUANDO O TEMPO DE REMOÇÃO É SUPERIOR AO TEMPO DE TRANSPORTE	166

TABELA 30 – CLASSIFICAÇÃO DAS OPERAÇÕES QUANDO O TEMPO DE REMOÇÃO É INFERIOR AO TEMPO DE TRANSPORTE	167
TABELA 31 – RESUMO DAS DIFERENTES COMBINAÇÕES DAS OPERAÇÕES DE UM CICLO DE TRABALHO	168
TABELA 32 – CLASSIFICAÇÃO DAS OPERAÇÕES QUANDO O TEMPO DE CARGA DO NICHOS É SUPERIOR AO TEMPO DE TRANSPORTE	170
TABELA 33 – CLASSIFICAÇÃO DAS OPERAÇÕES QUANDO O TEMPO DE CARGA DO NICHOS É INFERIOR AO TEMPO DE TRANSPORTE	170
TABELA 34 – CLASSIFICAÇÃO DAS OPERAÇÕES QUANDO NÃO SÃO UTILIZADOS EQUIPAMENTOS DE REMOÇÃO EXTRA	171
TABELA 35 – CLASSIFICAÇÃO DAS OPERAÇÕES QUANDO SÃO UTILIZADOS EQUIPAMENTOS DE CARGA E O TEMPO DE LIMPEZA DA FRENTE E DAS OUTRAS OPERAÇÕES É SUPERIOR AO TEMPO DE LIMPEZA DO NICHOS	172
TABELA 36 – CLASSIFICAÇÃO DAS OPERAÇÕES QUANDO SÃO UTILIZADOS EQUIPAMENTOS DE CARGA E O TEMPO DE LIMPEZA DA FRENTE E DAS OUTRAS OPERAÇÕES É INFERIOR AO TEMPO DE LIMPEZA DO NICHOS	173
TABELA 37 – RESUMO DAS DIFERENTES COMBINAÇÕES DAS OPERAÇÕES DE UM CICLO DE TRABALHO QUANDO UTILIZADOS NICHOS	174
TABELA 38 – RELAÇÃO ENTRE AS CLASSES DE RMR, A PERCENTAGEM DE AVANÇO E AS EXPRESSÕES PARA DETERMINAR O AVANÇO EM CADA TRAMO	189
TABELA 39 – VELOCIDADES DE PERFURAÇÃO, EM FUNÇÃO DA POTÊNCIA DO MARTELO E DA DUREZA DA ROCHA	189
TABELA 40 – POSSÍVEIS METODOLOGIAS DE CARREGAMENTO DE EXPLOSIVO E AS SUAS RESPECTIVAS VELOCIDADES	194
TABELA 41 – RELAÇÃO ENTRE O TIPO DE DETONADORES UTILIZADOS E A SUA VELOCIDADE DE LIGAÇÃO	196
TABELA 42 – TEMPO ADMITIDOS PARA CADA UM DOS MOVIMENTOS DO CICLO ELEMENTAR DE CARGA, DE UMA PÁ CARREGADORA	198
TABELA 43 – TEMPO DO MOVIMENTO DE DESCARGA, DO CICLO ELEMENTAR DE TRANSPORTE, DE UM CAMIÃO	199
TABELA 44 – TEMPO DE ALGUNS MOVIMENTOS DO CICLO ELEMENTAR DE CARGA DA FRENTE	201
TABELA 45 – VELOCIDADES DE DESLOCAÇÃO ADMITIDAS PARA UNIDADES DE CARGA	201
TABELA 46 – TEMPO DOS MOVIMENTOS DO CICLO ELEMENTAR DE CARGA DO NICHOS	203
TABELA 47 – TEMPO DO MOVIMENTO DE DESCARGA, DO CICLO ELEMENTAR DE TRANSPORTE DO NICHOS	204
TABELA 48 – VALORES DE DURABILIDADE ADMITIDOS PARA UM DOS INSTRUMENTOS ADMITIDOS COMO AÇO DE PERFURAÇÃO	209
TABELA 49 – CARACTERÍSTICAS DO PROJECTO DO EXEMPLO 1	214
TABELA 50 – CLASSIFICAÇÃO DO RQD, SEGUNDO O ÍNDICE Q, PARA UM MACIÇO ROCHOSO	225
TABELA 51 – CLASSIFICAÇÃO DO GRAU DE ALTERAÇÃO OU DE PREENCHIMENTO DAS DESCONTINUIDADES, SEGUNDO O ÍNDICE Q	225
TABELA 52 – CLASSIFICAÇÃO DO NÚMERO DE FAMÍLIAS DE DESCONTINUIDADES, SEGUNDO O ÍNDICE Q, PARA UM MACIÇO ROCHOSO	226
TABELA 53 – CLASSIFICAÇÃO DA RUGOSIDADE DAS DESCONTINUIDADES, SEGUNDO O ÍNDICE Q, PARA UM MACIÇO ROCHOSO	226
TABELA 54 – CLASSIFICAÇÃO DO ESTADO DE TENSÃO, SEGUNDO O ÍNDICE Q, PARA UM MACIÇO ROCHOSO	227
TABELA 55 – CLASSIFICAÇÃO DA PRESENÇA DE ÁGUA, SEGUNDO O ÍNDICE Q, PARA UM MACIÇO ROCHOSO	228

1. INTRODUÇÃO

1.1 ENQUADRAMENTO E OBJECTIVOS

Na actualidade, a escavação de um túnel envolve, ainda antes do início da sua escavação, um grande consumo de tempo no seu estudo, análise e previsão, para que toda a sua escavação e construção seja rigorosamente pensada e planeada. As exigências no estudo e previsão de todos os trabalhos e operações envolvidos na construção de túneis atingem, na maioria das vezes, patamares tão altos como os próprios trabalho de construção em si, devido à grande importância que estas estruturas possam ter, aos riscos que poderão acarretar e aos seus custos, que poderão ser de grande relevância, dependendo do projecto. A escavação de túneis, sem um intensivo estudo e previsão da evolução do projecto poderá ser considerada uma “baleia branca” na actualidade, principalmente nos países mais desenvolvidos. Pois a escavação de um túnel, sem ser baseada em informações e dados previamente obtidos, e com a sua respectiva análise, foi esquecida no passado, com o intuito de aumentar os níveis de eficiência e de segurança de todo o projecto, bem como reduzir os tempos de duração do projecto e os seus custos.

Ao nível da sociedade, principalmente para os grandes empreiteiros especialistas na escavação de túneis, o conhecimento prévio sobre o tempo que demorará a ser aberto um túnel, entre outras previsões, é essencial para a execução do projecto, pois permitirá que molde as características do seu trabalho às exigências do projecto ou até que o rejeite, pois poderá não possuir as condições para o realizar. Para tal uma previsão de qualidade do tempo de duração do projecto e dos custos acarretados é importantíssimo, pois será a base de comparação e decisão de muitos projectos. Sendo os túneis estruturas delicadas e complexos, não é descabido supor que a previsão de determinados parâmetros da sua escavação partilha dessa complexidade, considerando as diferentes metodologias e variáveis, principalmente ao nível das operações, que influenciaram todo o projecto. Logo, para uma previsão de qualidade, tal como preferido, é necessário um estudo pormenorizado de todas estas variáveis, principalmente quanto a sua influência no projecto e nas previsões desejadas.

Desta forma, devido à importância dos túneis para a sociedade e aos custos envolvidos na sua construção, surgem como relevantes os estudos de previsão, foco central desta dissertação. Pelo exposto, o objectivo desta dissertação é a criação de um utilitário informático que permita a estimação de parâmetros na escavação de túneis. O utilitário informático proposto pretende contribuir para os processos de optimização dos trabalhos de escavação de túneis, optimização essa de que nenhum projecto de engenharia actual poderá prescindir.

1.2 METODOLOGIA

Devido à natureza desta dissertação, pois é constituída por uma parte teórica e por uma parte de aplicação prática, sob a forma de criação de um utilitário informático, foi escolhida uma metodologia específica que permitisse uma maior produtividade e eficiência na sua elaboração.

Na primeira parte deste trabalho, o principal objectivo foi o estudo teórico de todos os temas relacionados com o trabalho, seja baseado em bibliografia ou em diálogos com pessoas conhecedoras e especialistas na matéria.

Após a obtenção e tratamento da informação essencial para o utilitário, deu-se a sua construção, sempre baseado no estudo teórico, de forma a realizar permanentes validações dos resultados obtidos da sua aplicação a situações concretas. Desta forma podemos então resumir a metodologia de construção da dissertação nos três seguintes processos: estudo teórico dos aspectos relacionados com os aspectos de escavação de um túnel, tradução do estudo teórico para uma linguagem matemática e construção do utilitário de estimação, fundamentado nas expressões matemáticas previamente criadas.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Para este trabalho, foram definidos alguns objectivos de estudo para que no seu final se tornasse possível realizar a construção de um utilitário informático, vulgarmente definido como *software*, que permitisse a estimação de diferentes características de um projecto de escavação de túnel. Numa primeira fase foi definido que a previsão da duração temporal do projecto seria o principal objectivo do utilitário, todavia, sem que seja retirada a importância a esta previsão, rapidamente se percebeu que a previsão de outras características, com uma forte ligação à duração do projecto, poderia ser realizada, enriquecendo assim o *software* e oferecendo mais informações fulcrais ao seu utilizador. Para além da referida previsão da duração do projecto, o *software* apresentado poderá prever, entre outros parâmetros, os metros perfurados, o volume de material rochoso desmontado, as distâncias percorridas pelos equipamentos de transporte, durante todo o projecto.

Logicamente, o utilitário não poderia ser construído sem uma forte base teórica, que fundamentasse todas as suas previsões. Tal base é constituída por um estudo extensivo sobre as principais características e parâmetros, do projecto, que serão relevantes para a sua estimação. Destas características é de salientar, o maciço rochoso em que será construído o túnel, a metodologia de escavação do túnel e todas as operações necessárias para que este

seja aberto. Sendo assim, ao longo deste trabalho, antes de ser apresentado o utilitário informático mencionado, serão referidas e estudadas as principais características levadas em conta para a construção do *software*, com o objectivo de justificar cada operação feita por este, bem como simplificar a sua compreensão.

Inicialmente, de forma a realizar uma breve apresentação sobre a evolução dos túneis, ao longo dos tempos, será feito um pequeno enquadramento histórico. Seguidamente será realçada a importância das características dos maciços rochosos, cruciais para a escavação de túneis, tal como as técnicas de investigação e caracterização aplicadas pelo Homem.

Findado o capítulo referente a investigação e estudo do maciço rochoso, será iniciado o estudo dos métodos de escavação de túneis, com principal foco para o método de Perfuração e Detonação. Mais tarde, sempre em relação a este método de escavação, devido a ser este o único método de foco a dissertação, serão desenvolvidos os conceitos e parâmetros de um diagrama de uma pega de fogo, por ser central, de todo o processo de escavação de um túnel.

No capítulo seguinte será estudado o ciclo de trabalho, constituinte de um projecto de escavação de túneis, e as suas operações constituintes. Este capítulo será alvo de uma relevante pormenorização, devido à extrema importância de cada uma das operações para todo o projecto e, evidentemente, para a sua previsão. O estudo de cada uma das operações, constituintes do ciclo de trabalho, terá como finalidade a sua tradução, principalmente a nível temporal, para uma linguagem matemática, com o propósito de podere ser introduzidas no utilitário proposto.

Finalmente, antes da apresentação e estudo do *software*, será estudada a relação entre o ciclo de trabalho e o seu projecto, com o principal objectivo de entender como poderá ser realizada uma previsão da duração temporal de um projecto baseada no tempo de duração de um dos seus ciclos de trabalho.

Como referido, terminado o estudo de todos os fundamentos essenciais para sustentar o *software*, será realizada a sua apresentação, sendo este estudo dividido nos três seguintes grupos: *inputs*, processo e *outputs*. Apresentado o utilitário proposto serão apresentados dois exemplos práticos da sua utilização.

2. ENQUADRAMENTO HISTÓRICO

Um túnel, como referido no Grande dicionário da língua Portuguesa, da Grande Biblioteca Multilingue, é uma “Passagem subterrânea que se abre através de montanhas, por baixo de um rio, de um caminho, etc.”. O principal propósito de um túnel é levar algo, podendo ser o Homem, de um determinado ponto a outro, de uma forma mais rápida, confortável e/ou segura, ultrapassando assim obstáculos que se encontram na nossa trajectória, tais como montanhas, rios e caminhos. Este objectivo está em muito ligado às linhas de comunicação e transportes, para veículos motorizados ou comboios. Para além deste objectivo, um túnel poderá permitir o contacto com determinada estrutura que exista no subsolo, como uma estrutura geológica que desejamos explorar. Este tipo do túnel está fortemente ligado à exploração mineira, especificamente à exploração subterrânea. Para além destas, a utilização de túneis com a finalidade de realiza o desvio e transporte de água é há muitos anos conhecida.

Para além dos objectivos que cada túnel poderá ter, estes podem apresentar grandes diferenças. Além das suas geometrias e tamanhos, a forma como são abertos e os “acabamentos finais” variam muito, dependendo do tipo de túnel que desejamos, do tipo de maciço rochoso em que estamos a trabalhar e da tecnologia e recursos utilizados.

Tal como a evolução do Homem, a evolução dos túneis tem acontecido, apoiando-se no constante crescimento do conhecimento, da ciência e da técnica. Desde muito cedo, nas civilizações mais antigas, a criação de túneis, de pequenas dimensões era essencial para a irrigação de campos e plantações. Na Figura 1 podemos observar um exemplo dessa utilização dos túneis, nomeadamente, um aqueduto romano, que tem como função permitir o transporte de água entre as piscinas de Salomão e Jerusalém.



Figura 1 – Interior de um aqueduto romano, que liga as Piscinas de Salomão a Jerusalém
(<http://ciencia.hsw.uol.com.br/tunel1.htm>)

Registos referem que o primeiro túnel para passagem automóvel foi construído em 1707, na Suíça, e que apresentava um comprimento de aproximadamente 61 metros. Enquanto o primeiro túnel, com o objectivo de servir de passagem a uma linha férrea é datado do ano de 1800, estando localizado em Derby, no Reino Unido. Sem o apoio da tecnologia actual, que trouxe vários equipamentos e ferramentas que melhoraram a eficiência e a segurança de todo o trabalho, no passado os túneis eram realizados de uma forma muito rudimentar, tal como observado na Figura 2.



Figura 2 – Trabalhos de escavação de um túnel em Sauderton, em 1902
(<http://www.forgottenrelics.co.uk/tunnels/construction/overview.html>)

Como podemos constatar desde muito cedo a escavação de túneis, com o propósito de ajudar o Homem, nos acompanha, levando cada vez mais a uma crescente aprendizagem e evolução. Os primeiros túneis, referidos atrás, foram os impulsionadores de grandes obras subterrâneas que permitiram ligações nunca imaginadas, tais como acontecem com o Eurotúnel (Canal da Mancha), um túnel de 50.5 quilómetros, e que liga a cidade de Cheriton em Inglaterra à cidade de Coquelles, em França, passando por baixo do Canal da Mancha, como observado na Figura 3. Dos 50.5 quilómetros deste túnel, 37.9 quilómetros encontram-se debaixo do mar, a uma profundidade média de 45.7 metros abaixo do fundo do canal. O Eurotúnel é constituído por três túneis, que permitem o transporte de passageiros, de veículos e de cargas. Na Figura 4, podemos observar alguns dos trabalhos realizados para construir este túnel, percebendo-se toda a complexidade do processo e a evolução dos equipamentos e operações.

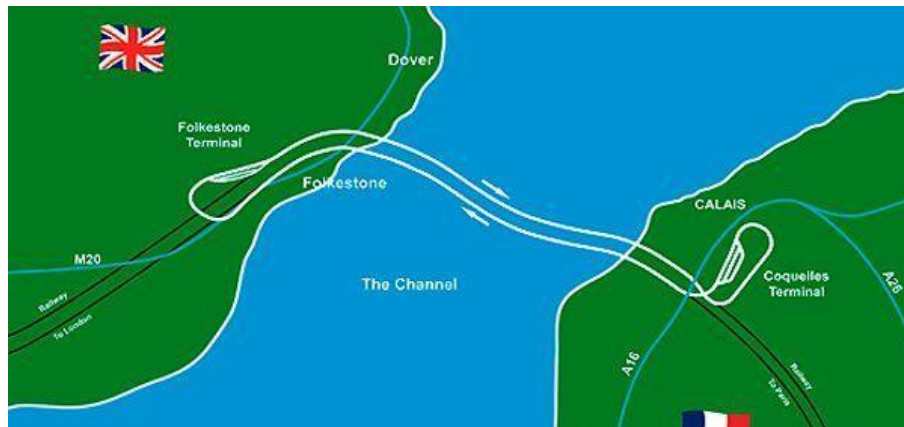


Figura 3 – Representação do Eurotúnel, ligando a Inglaterra a França
(<http://www.dailymail.co.uk/travel/article-2418496/Eurotunnel-offer-scenes-tours-weekend.html>)



Figura 4 – Trabalhos de construção do Eurotúnel
(<http://mosttutorials.blogspot.pt/2011/02/channel-tunnel.html>)

Para além do Eurotúnel, é de salientar o Túnel Laerdals, localizado na Noruega, e que realiza a ligação entre a cidade de Laerdals e a cidade de Aurland. Este túnel, finalizado em 2000, demorou aproximadamente 5 anos a ser concluído, e é considerado o túnel rodoviário mais longo do mundo, com aproximadamente 24,5 quilómetros, como observado na Figura 5, superando o túnel Gotthard por cerca de 8 quilómetros. Para a construção deste túnel, estimam-se que foram removidos 2.500.000 metros cúbicos de material rochoso, sendo que o túnel foi dividido em quatro secções ao longo de toda a sua extensão, sendo que a separar cada uma das secções foram construídas grandes cavernas, como visualizado na Figura 6, que possibilitam a paragens dos condutores, tanto para descansar como para contemplar a vista.



Figura 5 – Entrada do Túnel Laerdal, com a informação da sua extensão
(<http://www.skyscrapercity.com/showthread.php?t=392512&page=5>)



Figura 6 – Uma das cavernas de paragem do túnel Laerdal
(http://en.wikipedia.org/wiki/L%C3%A6rdal_Tunnel#mediaviewer/File:Laerdalstunnel_cave.jpg)

Para uma constante evolução dos túneis e da sua construção, grandes estudos e investigações foram necessárias, para que fosse possível a passagem de um pequeno túnel de alguns metros para um túnel de vários quilómetros sobre o fundo do mar. Essa grande evolução deu-se tanto nas técnicas de construção como nas técnicas de estudo do maciço rochoso em causa. A especialização do conhecimento nesta área, a constante investigação em técnicas de escavação de túneis, de equipamentos e ferramentas, mais recentes e mais especializados estudos de geologia, hidrogeologia apoiaram a referida evolução.

3. INVESTIGAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DE MACIÇOS ROCHOSOS

3.1 INTRODUÇÃO

Em projectos ligados à Engenharia de Minas e à Geoengenharia, devido às suas relações inseparáveis com as rochas, solo e terreno, é de extrema importância um conhecimento vasto sobre a geologia do local. Para a aquisição deste vasto conhecimento, diferentes estudos e testes são realizados no maciço rochoso onde se vão realizar as escavações, para a implantação de infra-estruturas úteis à sociedade, de forma a caracterizar geologicamente os maciços rochosos. O Homem e o seu projecto, terão de se adaptar às condições e características geológicas presentes, pois estas não são alteradas consoante se deseje. A geologia do local poderá obrigar a alterações no projecto desejado, que poderão passar por pormenores, como a sua duração, até mesmo à mudança de localização.

Quanto maior for o conhecimento que se possua sobre determinado maciço rochoso, melhor será a projecção do projecto desejado, levando em conta todas as condicionantes geológicas. Para a obtenção dessa informação vital, sobre o maciço rochoso, o Homem tem apresentado e aprimorado várias metodologias de estudos, divididas em variáveis tipos de ensaios, que permitem recolher diferentes informações e parâmetros sobre o maciço rochoso em estudo. Com estas informações recolhidas, pelo intensivo estudo do maciço rochoso, vários autores tem apresentado diferentes formas de classificar os maciços rochosos, com o objectivo de torna-los facilmente compreendidos, numa visão da engenharia, em qualquer parte do globo.

3.2 INVESTIGAÇÃO DE MACIÇOS ROCHOSOS

A investigação de maciços rochosos tem como principal função estudar e obter informações importantes, para um determinado projecto, sobre este. As informações sobre um maciço rochoso apresentam-se em grande número e em várias naturezas, sendo para tal necessário variados tipos de estudo para que as informações essenciais sobre o maciço sejam recolhidas. As principais informações a serem obtidas são: geologia, geotecnia, hidrologia e hidrogeologia, mineralogia e composição química. Como referido, as informações e dados a serem obtidos apresentam diferentes naturezas e propriedades, o que torna complexo a sua investigação.

Para combater esta dificuldade, o Homem têm-se concentrado na criação e aperfeiçoamento de técnicas e ensaios a serem aplicados no maciço, com o objectivo de obter as informações necessárias da forma mais fácil, económica e fiável. Na actualidade um grupo de métodos/ensaios é aplicável para a investigação de um maciço rochoso. Estes são geralmente divididos em métodos não-intrusivos e métodos intrusivos.

Contudo, para a investigação de um maciço rochoso, mesmo antes da aplicação das diversas metodologias de estudo, que contactam directamente com o maciço rochoso, é realizado um estudo superficial preliminar, que poderá fornecer informação bastante relevante sobre o maciço rochoso em causa, de uma forma bastante simples, rápida e económica. Neste estudo preliminar, é comum se realizar as seguintes acções:

- Estudo topográfico, recorrendo-se a cartas topográficas.
- Observações no terreno de perturbações causadas pelo deslocamento de rochas.
- Análises de estruturas existentes, próximas do local, nomeadamente se possuem danos.
- Observação do nível da água no subsolo, através de poços.
- Observação de possíveis marcas que traduzam a histórias das cheias no local
- Observação de afloramentos rochosos e perfis/cortes existentes, principalmente através de taludes.
- Estudo do clima da região.
- Diálogos com as comunidades locais (autoridades, técnicos, agricultores, empreiteiros, etc.) , na tentativa de obter informações relevantes sobre o local desejado.

As acções anteriormente referidas, são algumas das que deverão ser realizadas numa fase inicial, quando se deseja estudar e caracterizar um maciço rochoso. Contudo como referido, apenas permite um estudo superficial preliminar, sendo que para a escavação de túneis a informação sobre o maciço rochoso em profundidade é a de maior importância. Para a obtenção destas informações e características, como já referido, diferentes metodologias de estudo poderão ser aplicadas, com o objectivo de determinar diferentes características do maciço rochoso. De seguida será realizada uma breve apresentação sobre algumas das metodologias e ensaios passíveis de serem aplicados, bem como a importância da caracterização geológica e hidrogeológicas para projectos da escavação de túneis.

3.2.1 Geologia

A identificação da geologia é extremamente importante para a fase inicial de um projecto de escavação de túnel. Numa fase inicial a utilização de cartas geológicas do local em causa são bastante importantes e oferecem uma visão em grande escala da geologia do local. Mais tarde a identificação da geologia no campo torna-se importante, pois permite a identificação, em pormenor, das rochas, onde pode ser realizado um foco mais aprofundado da mineralogia, no estado de alteração, na fracturação, etc.

Os estudos apresentados anteriormente são bastante importantes, contudo apenas se focam na superfície do local, o que não é suficiente para um projecto de escavação de túneis, em que o maciço rochoso em profundidade é o principal. Para que o estudo da geologia seja conseguido, vários métodos são aplicados, podendo ser não-intrusivos, intrusivos ou em específico, através da amostragem. De salientar a importância da recolha de amostras, intactas ou não intactas, por permitem a observação do material rochoso, possibilitando na maioria das vezes uma boa observação da geologia, da mineralogia e da petrografia.

3.2.2 Hidrologia e Hidrogeologia

Na investigação de um determinado maciço rochoso, torna-se fundamental o conhecimento da hidrologia e da hidrogeologia do local, pois a presença de água e a sua quantidade apresenta uma influência muito relevante na qualidade do maciço rochoso e consequentemente no projecto. O conhecimento do nível freático é um dos pontos fulcrais deste estudo, bem como de outras estruturas hidrológicas. O nível freático apresenta uma grande importância para o projecto, pois a sua presença pode dificultar ou até mesmo inviabilizar um projecto de escavação de túnel. No caso de a cota do nível freático seja superior à cota do túnel, ocorrerão sempre infiltrações de água para o interior do túnel, obrigando a medidas de segurança apertadas e à instalações de bombas hidráulicas para remover a água. Devido a estas situações, facilmente se percebe que a hidrologia e hidrogeologia do local é apresenta uma grande influencia sobre um projecto de escavação de túneis.

Para a caracterização hidrológica e hidrogeológica do local, vários estudos são realizados. Inicialmente um estudo cartográfico torna-se essencial de forma a obter conhecimento das estruturas hidrológicas próximas do local. Um estudo da geologia é importante, pois a percolação e infiltrações de águas está directamente relacionado com o tipo de rocha constituinte do maciço e com o grau de fracturação. Para além destes estudos, vários ensaios podem ser realizados, de forma a obter-se informação sobre o nível freático, como a piezometria, referente à instalação de piezómetros ao longo de todo o maciço rochoso, a recolha de amostras de água subterrânea, etc.

3.2.3 Métodos Não-intrusivos

Os métodos não intrusivos, são os métodos de investigação do maciço em que não existe alteração do maciço, ou não é necessário remover-se material ou escavar-se. Estes métodos são muitas vezes referidos como métodos geofísicos, devido a grande preponderância dos estudos geofísicos nesta metodologia. A desobrigação de movimentar grandes volumes de solos e rochas apresenta uma das grandes vantagens deste método, porém os resultados dos ensaios geofísicos são de uma complexidade elevada, podendo levar a erros de compreensão. Os principais estudos geofísicos realizados para a investigação e caracterização de maciços são:

- Métodos sísmicos: Baseiam-se no estudo da propagação das ondas sísmicas ao longo do maciço rochoso.
- Métodos eléctricos: Estuda o comportamento do maciço rochoso, quando o atravessado por correntes eléctricas induzidas. De forma a detectar corpos com condutividade anómala.
- Método magnético: Esta metodologia estuda as variações do campo magnético, quando o maciço rochoso é atravessado por energia electromagnética.

Como podemos observa, diferentes abordagens não-intrusivas, podem ser realizadas para o estudo de um maciço rochoso, sendo que cada um dos métodos apresentados se adequa melhor conforme as características do maciço e as informações a adquirir.

Apesar do grande interesse dos diferentes métodos e de todas as suas vantagens, uma pormenorização dos mesmos torna-se complicada, devido a sua complexidade e a grande quantidade de informação relativa a cada um dos métodos. Contudo é de salientar a sua grande importância para as ciências da Terra, e a sua constante evolução, devida ao grande investimento na investigação e no desenvolvimento destes métodos.

3.2.4 Métodos Intrusivos

Como já dito, os métodos intrusivos são aqueles métodos em que existe remoção e alteração do material rochoso da área onde se realizam os estudos. Estas alterações do maciço acontecem devido à remoção de material, com a principal função de ser realizada o seu estudo em laboratorial, a que se designa de amostragem, ou a introdução de equipamentos, no maciço rochoso, normalmente com a aplicação de grandes cargas, como os ensaios *in-situ*.

3.2.4.1 Ensaio *in-situ*

Os ensaios *in-situ*, dentro da metodologia intrusiva, são os ensaios realizados no local, sem a necessidade de recolha de amostras para estudo prévio em laboratório, em que existe a alteração do material rochoso ou solo ensaiado. Em geral, estes ensaios são caracterizados pela cravação de diversos equipamentos, que realizam a amostragem, através de aplicação de grandes cargas. Devido à grande resistência das rochas, estes tipos de ensaios não são aplicados para material rochoso, sendo a única excepção as rochas brandas. Como os solos apresentam uma resistência muito inferior as rochas, estes ensaios são ideias para a obtenção de informação deste tipo de material. Devido à inaplicabilidade destes ensaios em rocha, o seu estudo para este trabalho não apresenta grande importância, contudo seguidamente, na Tabela 1, serão citados os principais ensaios *in-situ*, e os parâmetros medidos por estes:

Utilitário de Apoio à Estimação de Parâmetros na Escavação de Túneis

Tabela 1 – Exemplo de alguns ensaios *in-situ* e dos parâmetros passíveis de serem adquiridos

Ensaio	Parâmetros adquiríveis
SPT - Penetração dinâmica	Compactação e consistência derivado de modelos padrão
SCPTu - Cone penetrometro sísmico	Densidade, Resistência, Rigidez, propriedades hidráulicas
PMT - Pressiômetro	Compressibilidade e capacidade de carga
DMT - Dilatômetro de MArchetti	Estado de tensões, histórica de tensões, resistência e propriedades hidráulicas
PLT - Carga em placa	Módulo de deformabilidade e capacidade de carga
FVT - Corte rotativo	Resistência ao corte não drenada

3.2.4.2 Amostragem

A amostragem, tem como principal objectivo a obtenção de amostras ou testemunhos, que poderão ser de rocha, solo ou água, com o principal objectivo de realizar o seu estudo em laboratório de forma a obter as informações fundamentais sobre o maciço. A amostragem segue normas pré-definidas, com o objectivo de ser realizada com a melhor qualidade possível, fornecendo assim amostras representativas do maciço. De uma forma geral, podem ser recolhidas dois tipos de amostras, indeformadas ou remexidas. Na Tabela 2 podemos observar as diferenças entre os dois tipos de amostras.

Tabela 2 – Tipos de amostras e as suas características

Tipos de amostras	Características
Indeformada	Amostras que conversam todas as características, que seriam observadas <i>in-situ</i> , excluindo o estado de tensão
Remexida	Amostras que não conservam todas as propriedades que seriam observadas <i>in-situ</i>

Para além do tipo de amostras, diferentes metodologias e equipamentos de amostragem podem ser utilizados, havendo uma grande distinção no caso de se desejar amostrar solo ou rocha. O método de amostragem aplicado em rocha é designado como amostragem à rotação ou sondagem à rotação. Esta metodologia é aplicada graças aos equipamentos de perfuração e possibilita a obtenção de amostras contínuas e com grande taxa de recuperação. Nos equipamentos de perfuração, para se obter as amostras, é acoplado no início das varas de perfuração uma coroa, constituída por metais duros (vulgarmente o tungsténio) e diamantes, que são responsáveis pelo corte da rocha. O corte dessa rocha dá-se num formado circular, correspondente ao diâmetro da coroa, sendo recolhido no interior da coroa, pelo amostrador, à medida que a perfuração avança, a amostra de rocha cortada. O amostrador pode apresentar diferentes características, consoante as características do material a ser amostrado e das exigências da qualidade da amostra. A principal característica variável dos amostradores é o seu número de paredes, podendo varia entre uma a três. Quando o amostrador possui uma única parede, esta acompanha o movimento rotacional da coroa, aplicando perturbações na amostra, enquanto no caso de amostradores de parede dupla, apenas a parede exterior

acompanha o movimento rotacional, estando a parede inteiro estática, protegendo desta forma a mostra das alterações. Os amostradores triplos são mais específicos, sem utilizados principalmente para rochas de fraca qualidade, tendo a parede extra o objectivo de acondicionar a amostra, não permitindo que esta se desagregue. Como podemos observar, através da Figura 7, as coroas são comercializadas em diferentes formatos, diâmetros e comprimentos. Facilmente se compreende que a amostragem de rochas é consideravelmente mais dispendiosa do que a amostragem em solo. Contudo a obtenção de amostra de grande qualidade possibilita a realização de ensaios laboratoriais de grandes exigências.



Figura 7 – Exemplo de coroas de perfuração, para amostragem, da Atlas Copco (www.atlascopco.pt)

3.2.5 Ensaios Laboratoriais

Na posse de amostras/testemunhos do maciço rochoso ou solo, o seu estudo e caracterização poderá ser realizado em laboratório, com a aplicação de vários ensaios, de forma a se obter o máximo de informação acerca do maciço rochoso ou solo.

A análise petrográfica é um dos estudos mais fáceis de aplicar, possibilitando um conhecimento mais aprofundado sobre a natureza e o tipo de rocha, bem como dos minerais presentes. No caso de as amostras serem cilíndricas, obtidas através da amostragem à rotação, deverá ser realizada a determinação do RQD, que será referido mais tarde, já que este não exige ensaio da amostra, apenas obriga à sua visualização. Na Tabela 3 podemos observar outros dos principais ensaios laboratoriais a serem realizados.

Tabela 3 – Principais ensaios laboratoriais: características e informações obtidas

Ensaio	Informação obtida
Compressão uniaxial	Módulo Young, Coeficiente de Poisson, Tensão-limite de ruptura.
Compressão triaxial	Modulo Young, Coeficiente de Poisson
Tracção	Resistência à tracção
Deformação residual	Tensões in-situ

3.3 CLASSIFICAÇÃO DE MACIÇOS ROCHOSOS

Um determinado maciço rochoso poderá ser alvo de diferentes classificações, cada uma destas, avaliadora de diferentes características e parâmetros. A escolha das classificações a aplicar é influenciada em grande medida pelo propósito a que se destina o maciço e pelas informações que possuímos. As classificações podem ser divididas principalmente em dois grandes grupos, as geológicas e as geomecânicas, sendo que as ultimas apresentam uma maior relevância na actualidade. Com as informações obtidas através dos diferentes estudos, alguns referidos anteriormente, pode ser realizada a classificação de um maciço rochoso, seja geologicamente ou geomecanicamente. Desta forma, de seguida serão apresentadas os principais métodos de classificação, destes dois grandes grupos, com um principal ênfase nas classificações geomecânicas, que terão um papel preponderante para esta dissertação e para o *software* que advém dela.

3.3.1 Classificação Geológica

Como referido, esta é a classificação mais simples de um maciço rochoso, sendo considerada uma classificação visual, passível de ser realizada sem o apoio de ensaios *in-situ* ou laboratoriais. Devido à sua simplicidade, este tipo de classificação não é plena para caracterizar um maciço rochoso, não devendo desta forma ser utilizada como única classificação de um determinado maciço.

Um dos principais parâmetros a serem determinados por esta classificação, é o tipo de rocha existente no maciço rochoso. Sendo também complementado com informações mineralógicas e petrográficas. A grande desvantagem desta classificação é que o conhecimento do tipo de rocha ou rochas presentes no maciço rochoso não poderá ser uma base sólida para sustentar o conhecimento do maciço rochoso, pois como é sabido, dois maciços rochosos constituídos pela mesma rocha, apresentam características, principalmente geomecânicas, totalmente distintas, que representam a sua composição, a sua génese e a sua vida geológica. Neste tipo de classificações, de forma a oferecer uma maior e melhor informação quanto ao maciço rochoso, várias caracterizações e análises quanto ao estado de alteração do maciço e quanto

ao número de famílias de fracturas são realizados, de forma a completar as informações já obtidas.

3.3.2 Classificações Geomecânicas

Conhecidas as características geologias e geotécnicas de um determinado maciço rochoso, pode tornar-se difícil a classificação deste, baseado nas suas características, ao nível da suas capacidades de engenharia. Neste caso se o maciço é adequado para “receber” um túnel.

Vários autores ao longo dos tempos, acompanhado pela evolução tecnologia dos estudos geológicas e geotécnicos, tem apresentado várias classificações para maciços rochosos (*Rock Mass Classification*). Uma das primeiras classificações de massas rochosas apareceu no ano de 1879, apresentado por Riltter, que na sua primeira tentativa de classificar maciços, interligou as características de determinado maciço, com a construção de túneis e com os suportes que teriam de ser realizados. A partir dessa primeira classificação de Riltter, várias outras classificações aparecerem, entre elas as de Terzaghi (1946), Wickham (1972), Rocha (1976) e de Hoek (inicialmente em 1994), baseadas em estudos e projecto previamente realizados, que serviam de base de dados de informação. Para além das previamente referidas será dado um principal enfase ao RQD, de Deere, ao RMR, apresentado por Bieniawski, e ao Índice Q, de Barton et al.

3.3.2.1 RQD

Um dos testes mais conhecido mundialmente, devido a sua simplicidade e expressão, é o RQD, Rock Quality Designation Index, que durante muitos anos, era utilizado como um classificador de maciços rochosos, mas que no presente, devido às exigências de conhecimento do maciço, é um dos componentes das classificações existentes, estando presente na maioria das classificações utilizadas mundialmente. Como tal, devido a sua preponderância nas classificações de massas rochosos, é importante um estudo deste ensaio.

O RQD, foi apresentado inicialmente em 1964, por Deere, que relacionou as condições de logs de sondagem, realizados no maciço, com as suas características. Para tornar o RQD um ensaio mais fidedigno, Deere, definiu que o valor deste ensaio seria similar à percentagem de material rochoso intacto, com um comprimento superior a 10 centímetros, presente em todo o comprimento do log de sondagem. Na Figura 8 podemos observar a exemplificação de um teste RQD, em eu se determina o valor do índice do log de sondagem representado. Deere aconselhou também, de forma a tornar o resultado uniforme, reduzindo as discrepâncias de valores de ensaios para ensaio, que a extracção do log de sondagem deveria ser realizada por um cabeça de corte, com tubo duplo, e que o diâmetro do log deveria ser no mínimo de 54.7 milímetros.

O principal objectivo do RQD, é representar a qualidade do maciço rochoso in situ, isto é, nas suas condições originais, desta forma, na contabilização das descontinuidades do log de sondagem, devera ser realizada uma observação minuciosa, para não serem confundidas descontinuidades existentes no maciço com descontinuidades criadas pelo processo de perfuração, devendo estas últimas de serem ignoradas.

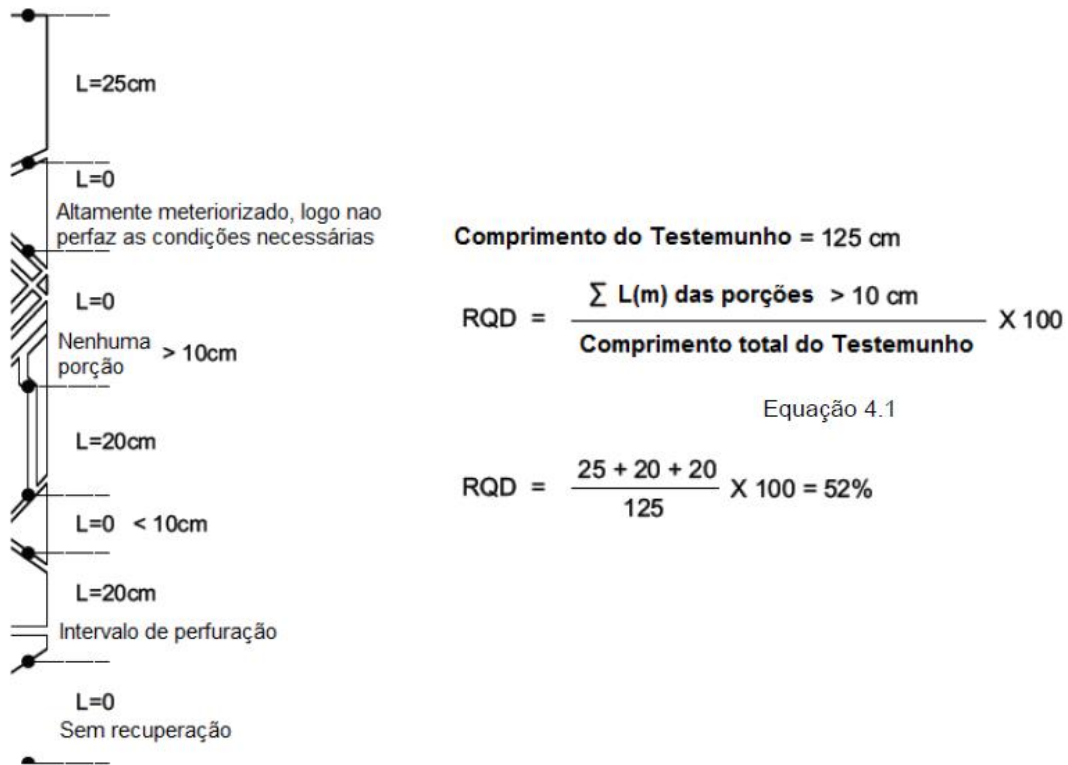


Figura 8 – Exemplificação de um ensaio RQD e da sua quantificação prévia (David Chapman, 2010)

Em conclusão do índice RQD, é de referir que apesar da importante informação fornecida por este, a sua aplicação é bastante limita, não sendo utilizado como o único meio de caracterização de um maciço, pois apesar de realização uma caracterização muito boa das fracturas, existem outras estruturas geológicas, como a xistosidade e a estratificação, que influenciam o comportamento do maciço e que não são tomados em conta.

3.3.2.2 Rock Mass Rating

O Rock Mass Rating, ou simplesmente RMR, foi apresentado pela primeira vez 1973 por Bieniawski, tendo sido, até hoje, constantemente alterado e refinado, servindo até mesmo de base para outras classificações que apareceram. O RMR é uma das classificações mais disseminadas pelo Mundo, sendo a versão de 1989, também apresentada pelo seu criador, a mais utilizada. Uma das grandes vantagens do sistema RMR, é a simplicidade, graças aos poucos parâmetros (geométricos e mecânicos) do maciço rochoso que são utilizados. Sendo

outra a sua fiabilidade, comparativamente com classificações baseadas apenas num parâmetro, como o RQD. Os parâmetros levados em conta são:

- Resistência à compressão uniaxial do material rocha
- Rock Quality Designation
- Espaçamento das descontinuidades
- Condição das descontinuidades
- Caudal de água percolada
- Orientação das descontinuidades

Desta forma para aplicação do RMR num determinado maciço, deverão ser caracterizadas e determinados estes parâmetros, contudo, esta tarefa poderá tornar-se difícil, caso o maciço em estudo seja muito extenso e heterogéneo, apresentando várias geologias e características mecânicas ao longo da sua estrutura. Então, para uma melhor aplicação da classificação RMR é aconselhável a divisão do maciço em zonas geológicas. Esta divisão, com o propósito de ser facilitada, é efectuada coincidindo os contornos das zonas geológicas com as principais falhas ou mudanças de tipo de rocha, sendo que por vezes, até mesmo zonas geológicas, devido à grande variedade das suas características, necessitam de mais divisões, para permitir uma melhor classificação do maciço.

A classificação RMR, propriamente dita, baseasse nos seis parâmetros referido precedentemente, em que para cada um dos parâmetros, Bieniawski, apresentou diferentes características, que levarão a diferentes “pesos”, com o propósito de quantificar cada parâmetro da classificação, sendo que no seu final, o somatório dos pesos será considerado como o resultado da classificação RMR. Seguidamente, são apresentadas as diferentes características definidas pelo autor, para os seis parâmetros apresentados, sendo visível também os “pesos” de cada uma delas.

- **Resistência da Rocha Intacta**

Tabela 4 – Classificação da Resistência da rocha intacta, segundo o RMR, para um maciço rochoso

Resistência da rocha intacta	Resistência de Ponta	> 10 MPa	4-10 MPa	2-4 MPa	1-2 MPa	Ver compressão axial		
	Compressão uniaxial	> 250 MPa	100-250 MPa	50-100 MPa	25-50 MPa	5-25 MPa	1-5 MPa	< 1 MPa
Pesos		15	12	7	4	2	1	0

- **RQD**

Tabela 5 – Classificação do RQD, segundo o RMR, para um maciço rochoso

R.Q.D.	90-100 %	75-90 %	50-75 %	25-50 %	< 25 %
Pesos	20	17	13	8	3

- **Espaçamento das Descontinuidades**

Tabela 6 - Classificação do Espaçamento das descontinuidades, segundo o RMR, para um maciço rochoso

Espaçamento das descontinuidades	> 2 m	0,6-2 m	200-600 mm	60-200 mm	< 60 mm
Pesos	20	15	10	8	5

- **Condição das Descontinuidades**

Para este parâmetro, uma de duas tabelas poderão ser utilizadas, para a sua caracterização. Caso a informação sobre as descontinuidades seja diminuta, deverá ser utilizada a primeira tabela, contudo caso se esteja no poder sobre bastante informação sobre as descontinuidades, deverá ser utilizada a segunda tabela, que levará a uma melhor caracterização, e precedente quantificação, do parâmetro. As descontinuidades são bastante importantes para o maciço rochoso, pois influenciam a sua deformabilidade, permeabilidade e resistência ao corte.

Tabela 7 - Classificação da condição das descontinuidades, segundo o RMR, para um maciço rochoso, caso a informação seja reduzida

Condição das descontinuidades	Superfícies muito rugosas, não contínuas, sem separação, paredes de rocha não alteradas	Superfícies ligeiramente rugosas, separação < 1 mm, paredes ligeiramente alteradas	Superfícies ligeiramente rugosas, separação < 1 mm, paredes muito alteradas	Superfícies polidas ou com enchimento com espessura < 5 mm ou juntas contínuas com separação 1-5 m	Enchimento mole com espessura > 5 mm ou juntas contínuas com separação > 5 mm
Pesos	30	25	20	10	0

Utilitário de Apoio à Estimação de Parâmetros na Escavação de Túneis

Tabela 8 - Classificação da condição das discontinuidades, segundo o RMR, para um maciço rochoso, caso a informação seja vasta

Comprimento da descontinuidade (persistência)	< 1 m	1-3 m	3-10 m	10-20 m	> 20 m
Pesos	6	4	2	1	0
Separação (abertura)	Nenhuma	< 0,1 mm	0,1-1 mm	1-5 mm	> 5 mm
Pesos	6	5	4	1	0
Rugosidade	Muito rugoso	Rugoso	Ligeiramente rugoso	Quase liso	Liso
Pesos	6	5	3	1	0
Enchimento	Nenhum	Duro com espessura < 5 mm	Duro com espessura > 5 mm	Mole com espessura < 5 mm	Mole com espessura > 5 mm
Pesos	6	4	2	2	0
Grau de alteração	Não alteradas	Ligeiramente alteradas	Moderadamente alteradas	Muito alteradas	Em decomposição
Pesos	6	5	3	1	0

- Presença de Água**

De todos os parâmetros contabilizados pelo RMR, as condições de presença de água, é um dos mais relevantes para projectos de escavação de túneis e para esta dissertação. Como referido os estudos hidrológicos e hidrogeólogos são extremamente importantes para projectos subterrâneos, como a escavação de túneis. A presença de água pode influenciar as várias operações de trabalho, fundamentalmente numa perspectiva negativa, pois obrigam a trabalhos mais cuidados, lentos e geralmente mais dispendiosos. Desta forma, devido à importância da hidrologia e hidrologia do maciço rochoso, este parâmetro do RMR tem uma relevância elevada, pois possibilita que estas condições influenciem directamente o projecto.

Tabela 9 - Classificação da presença de água, segundo o RMR, para um maciço rochoso

Presença de Água	Caudal por 10m de comprimento do túnel	Nenhum	< 10 L/min	10-25 L/min	25-125 L/min	> 125 L/min
	Relação pressão da água vs tensão principal máxima	0	< 0,1	0,1-0,2	0,2-0,5	> 0,5
	Condições gerais	Completamente seco	Água intersticial	Húmido	Escorrimentos	Entrada de água
Pesos		15	10	7	4	0

- **Orientação das Descontinuidades**

Dos parâmetros constituintes do RMR, a “Orientação das Descontinuidades” é aquela que nos poderá fornecer um “peso” negativo. Sendo também, uma das que mais dificuldade poderá apresentar na sua caracterização. A orientação das descontinuidades, para se evitarem erros de caracterização, foi definida universalmente, como a orientação do “*strike*” do plano destas. Na Figura 9 é-se possível observar dois casos distintos, em que no primeiro o plano das descontinuidades se encontra a favor da escavação, e em que no segundo caso ocorre o oposto, sendo o plano de falhas contra a escavação. Logicamente, um maciço rochoso, nestas duas diferentes situações, apresentara classificações, neste parâmetro, diferentes.

Para além da orientação das descontinuidades, não deverão ser esquecidas outras características geotécnicas destas, como a amplitude, o eventual preenchimento e as características das paredes, em caso de não existir preenchimento.

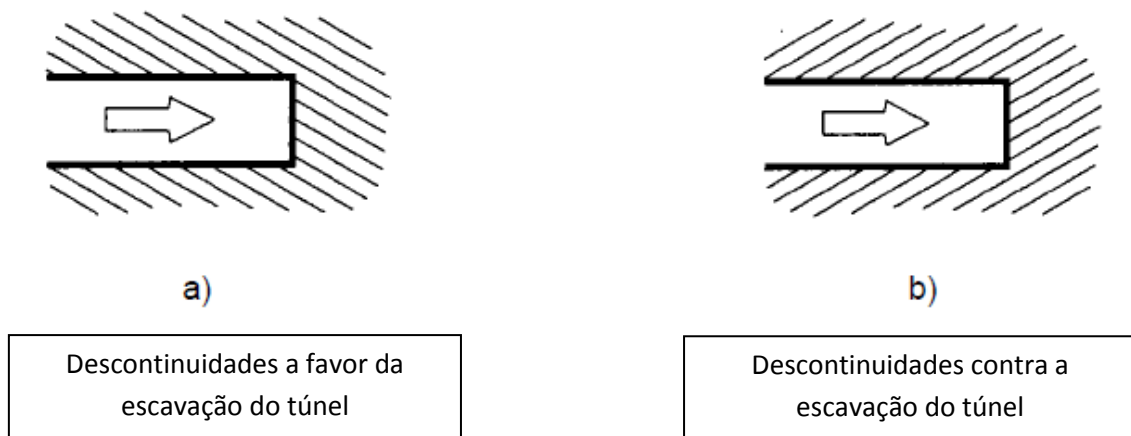


Figura 9 – Representação das possíveis relações entre a orientação das descontinuidades e a direcção de escavação de um túnel

Utilitário de Apoio à Estimação de Parâmetros na Escavação de Túneis

Tabela 10 - Classificação da orientação das descontinuidades, segundo o RMR, para um maciço rochoso

Direcção perpendicular ao eixo do túnel				Direcção paralela ao eixo do túnel		Inclinação 0-20°
Abertura do túnel no sentido da inclinação		Abertura do túnel no sentido inverso da inclinação				
Inclinação 45-90°	Inclinação 20-45°	Inclinação 45-90°	Inclinação 20-45°	Inclinação 45-90°	Inclinação 20-45°	
Muito favorável	Favorável	Razoável	Desfavorável	Muito desfavorável	Razoável	Razoável
Orientação das descontinuidades		Muito favorável	Favorável	Razoável	Desfavorável	Muito desfavorável
Pesos	Túneis e minas	0	-2	-5	-10	-12
	Fundações	0	-2	-7	-15	-25
	Taludes	0	-5	-25	-50	-60

Determinados todos os parâmetros da classificação RMR e realizada a sua “pesagem” é efectuada a soma de todos esses pesos, sendo o seu total que nos indicará a que classe o maciço rochoso em estudo irá pertencer. Bieniawski, apresentou na sua classificação, cinco classes, em que determinado maciço ou zona geológica poderá se localizar, sendo que cada uma dessas classes apresenta as suas características ao nível do tempo médio de sustentação sem suporte quando escavado, da coesão e do ângulo de atrito.

Tabela 11 – Classificação RMR: classes, descrição, tempo médio de sustentação, coesão e ângulo de atrito

Peso Global	100 - 81	80 - 61	60 - 41	40 - 21	<21
Classe	I	II	III	IV	V
Descrição	Muito Bom	Bom	Razoável	Fraco	Muito Fraco
Tempo médio sustentação sem suporte	20 anos para 15 m de vão	1 ano para 10 m de vão	1 semana para 5 m de vão	10 horas para 2,5 m de vão	30 minutos para 1 m de vão
Coesão (KPa)	>400	300 - 400	200 - 300	100 - 200	< 100
Angulo atrito (°)	> 45	35 - 45	25 - 35	15 - 25	< 15

Como observável, de todas as classes apresentadas, a mais desejada e preferível para projecto da de escavação de maciços rochosos, no nosso caso de túneis, é a classe I, pois desta forma o “nosso” maciço apresentaria condições muito boas, principalmente ao nível do seu suporte, evitando, teoricamente, grandes métodos de sustimento.

Por curiosidade, outras classificações baseadas no RMR de Bieniawski são o MRMR, ou Modified Rock Mass Rating, de Laubsher, que se foca principalmente nas no stress in-situ provocado, no maciço, pelo rebentamento de explosivos e pela meteorização. O Slope Mass Rating, SMR, criado por Roma, é também uma das evoluções do RMR, sendo esta classificação voltada para a estabilidade e caracterização ode taludes.

3.3.2.3 Rock Tunneling Quality Index

O Índice Q, expressão mais simples para designar o *Rock Tunneling Quality Index*, é uma das classificações geomecânicas mais utilizadas no Mundo, criada por Barton et al. e seus companheiros, no ano de 1974, na Noruega. Tal como o RMR, baseia-se na classificação quantitativa de vários parâmetros do maciço rochoso, sendo neste caso os seguintes:

- RQD
- Número de famílias de fracturas, J_n
- Rugosidade da descontinuidade/fractura mais desfavorável, J_r
- Grau de alteração ou de preenchimento das fracturas, J_a
- Presença de água, J_w
- Estado de tensão, SRF

As tabelas apresentadas por Barton, para cada parâmetro, com as diferentes condições possíveis e os respectivos índices, podem ser observadas em anexo. Nomeadamente as Tabelas 50, 51, 52, 53, 54 e 55, em anexo.

Depois de caracterizados todos os parâmetros e obtidos os índices correspondentes torna-se mais simples a classificação do maciço pelo índice Q, aplicando-se a Equação 1, para obtermos a representação quantiava-a dessa classificação.

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF} \quad (\text{Eq. 1})$$

Barton ao constituir esta expressão por três quocientes. Pretende de uma forma simples representar três parâmetros do maciço em estudo. O quociente (RQD/J_n) representa a relação das dimensões dos blocos/partículas, o (J_r/J_a) a força de cisalhamento intra-blocos e o quociente (J_n/SFR) o stress activo (“active stress”).

Utilitário de Apoio à Estimação de Parâmetros na Escavação de Túneis

Tal como acontece e observado na classificação RMR, Barton, permite obter, juntamente com a classificação do maciço rochoso, informações sobre o nível e a intensidade do sustimento a ser aplicado na escavação de túneis, dependendo das características do maciço rochoso. Para se obter esta informação, é necessário a determinação de um parâmetro designado de Dimensão Equivalente (“Equivalent Dimension”), que relaciona as dimensões da escavação (túnel) e o factor ESR, Excavation Support Ratio, que é fornecido por Barton, devendo o valor do índice corresponder às características da escavação em causa.

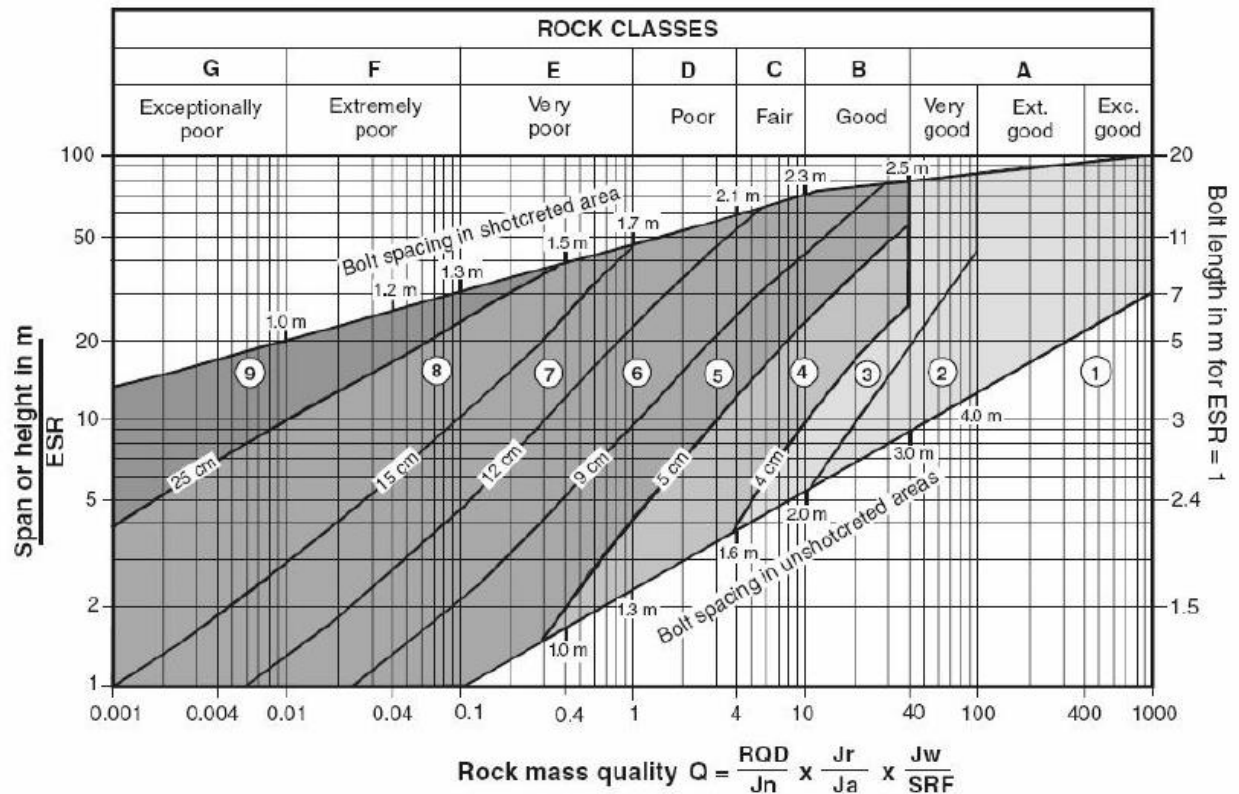
Tabela 12 – Relação entre o ESR e o tipo de escavação a ser realizada

Categoria da escavação		ESR
A	Aberturas mineiras temporárias	3 - 5
B	Aberturas mineiras permanentes, túneis de passagem de água (excluindo de alta pressão), túneis piloto ou de desvio, escavações superiores de grandes cavidades	1.6
C	ETA, túneis rodoferroviários pequenos, túneis de acesso, locais de armazenamento	1.3
D	Centrais subterrâneas, túneis rodoferroviários grandes, bocas de entrada, abrigos de defesa	1.0
E	Centrais nucleares subterrâneas, estações ferroviárias, fabricas, instalações públicas ou desportivas	0.8

Conhecendo-se o valor ESR e as dimensões a escavação, é necessário a Equação 2 para determinar a Dimensão Equivalente.

$$D_e = \frac{\text{Dimensões da escavação (metros)}}{ESR} \quad (\text{Eq. 2})$$

Com o valor do parâmetro Dimensão Equivalente e o valor do Índice Q do maciço rochoso em causa, poderemos obter informações sobre o sustimento e as medidas de contenção a aplicar no nosso projecto, segundo Barton, através da seguinte tabela:



REINFORCEMENT CATEGORIES:

- | | |
|--|--|
| 1) Unsupported | 6) Fibre reinforced shotcrete and bolting, 9 - 12 cm |
| 2) Spot bolting | 7) Fibre reinforced shotcrete and bolting, 12 - 15 cm |
| 3) Systematic bolting | 8) Fibre reinforced shotcrete, > 15 cm, reinforced ribs of shotcrete and bolting |
| 4) Systematic bolting, (and unreinforced shotcrete, 4 - 10 cm) | 9) Cast concrete lining |
| 5) Fibre reinforced shotcrete and bolting, 5 - 9 cm | |

Figura 10 – Classes segundo o Índice Q, apresentado por Barton (Grimstad e Barton, 1993)

Como foi possível visualizar, as classificações geomecânicas apresentam uma grande utilidade para a caracterização dos maciços rochosos onde se irá realizar os trabalhos. As classificações basearem-se na quantificação de vários parâmetros facilmente observáveis, não exigindo grandes tecnologias e equipamentos, podendo, desta forma, ser aplicadas a nível mundial. Estas características tornam as classificações de fácil compreensão e universais, pois determinado valor de RMR ou do Índice Q, terá o mesmo significado em qualquer parte do Mundo. Para além destas vantagens, a previsão do tipo de sustimento e de medidas de suporte bem como das suas intensidades de aplicação, baseadas nas características do maciço rochoso, torna-se um grande aliado para a previsão dos projectos de construção.

3.3.3 Relação entre o RMR e o Índice Q

Tal como as classificações, várias relações entre o RMR e o Índice Q, para um mesmo maciço, existem, apresentadas por vários autores. Os autores destas relações baseiam-se em centenas de casos de estudo, que tenham cobrir todas as possibilidades de resultados das duas classificações. Uma das relações mais conhecidas foi apresentada pelo criador do RMR, Bieniawski, em 1989. Este baseou-se em mais de uma centena de caso de estudo (117 casos), espalhados por todo o Mundo, para apresentar a Equação 3, representativa da relação entre os resultados do RMR e do Índice Q:

$$RMR = 9 \ln Q + 44 \quad (\text{Eq. 3})$$

Baseados em outros casos de estudo autores, como Rutlege e Preston em 1978, Moreno em 1980, entre outras apresentaram diferentes relações. Contudo, na presença de tantas relações entre os resultados das duas classificações, tornou-se importante classificar essas relações, de forma a se poder escolher a relação mais verosímil, que forneça os resultados com um maior grau de certeza. Para tal foram estudadas todas as relações determinadas para os diferentes casos de estudo, aproximadamente 250 casos de estudo no total, em que os autores se basearam, determinando-se o coeficiente de correlação de cada uma as relações existentes. Conhecido o coeficiente de correlação, torna-se mais fácil conhecer a relação mais fidedigna, que corresponderia aquela que apresenta-se um maior coeficiente de correlação.

Tabela 13 – Relações, apresentadas por vários autores, entre o RMR e o Índice Q

Autor	Expressão	Coeficiente de correlação
Bieniawski (1989)	$RMR = 9 \ln Q + 44$	0.77
Rutlege e Preston (1978)	$RMR = 5.9 \ln Q + 43$	0.81
Moreno (1980)	$RMR = 5.4 \ln Q + 55.2$	0.55
Cameron-Clarke e Budavari (1981)	$RMR = 5 \ln Q + 60.8$	Sem correlação lógica
Abade t al. (1984)	$RMR = 10.5 \ln Q + 41.8$	0.66

Como podemos observar pela tabela anterior, Tabela 13, a expressão apresentada por Rutlege e Preston, é aquela que apresenta um maior Coeficiente de correlação, seguida pela expressão de Bieniawski. Portanto, no caso de a classificação do maciço rochoso estiver apresentada segundo o Índice Q, de Barton, é aconselhada a utilização da relação de Rutlege e Preston, para converter os resultados para a classificação RMR, para poder ser aplicada no utilitário informático.

3.4 ESCAVABILIDADE

Apesar das várias classificações que um maciço rochoso pode ser alvo, vários autores defendem, que estas não são totalmente esclarecedoras sobre as características de resposta que um maciço rochoso apresentará quando é escavado, como acontece na construção de um túnel. Desta forma, ao longo dos tempos tem evoluído o conceito de escavabilidade de um maciço rochoso, caracterizando a sua capacidade de resistir aos trabalhos de escavação, sejam estes realizados mecanicamente ou por explosivos.

Para caracterizar a escavabilidade de um maciço rochoso, diferentes parâmetros podem ser aplicados, dependendo da metodologia aplicada por cada autor, contudo o RQD e a resistência à carga pontual são os parâmetros mais aproveitados por todas as metodologias. Na Tabela 14 é possível a visualização de vários critérios de escavabilidade e dos seus parâmetros.

Tabela 14 – Principais critérios de escavabilidade e os parâmetros em que se baseiam

Critérios de escavabilidade	Parâmetros utilizados
Franklin (1971)	Índice de resistência à carga pontual; Espaçamento médio entre fracturas; Resistência à compressão simples; Número de Schmidt; RQD
Weaver (1975)	Velocidade sísmica; Dureza; Grau de alteração; Características das diáclases (espaçamento, preenchimento, orientação e continuidade)
Atkinson (1977)	Resistência à compressão simples
Romana (1981)	Resistência à compressão uniaxial; RQD; Grau de abrasividade
Kirsten (1982)	Resistência à compressão uniaxial; RQD; J_n e J_r do Índice Q; Posição relativa dos blocos; Alteração das diáclases
Singh (1989)	Resistência à tracção; Grau de alteração e abrasividade; Espaçamento de diáclases

Dos métodos anteriores, os mais aplicados para caracterizar a escavabilidade de maciços rochosos, são os métodos apresentados por Franklin e Kirsten, que devido à sua importância serão apresentados mais pormenorizadamente a seguir.

3.4.1 Critérios de escavabilidade por Kirsten

Baseado nos parâmetros referidos anteriormente, o autor apresentou a Equação 4, que nos permite determinar a escavabilidade de um maciço em função de um índice N , representativo do índice de escavabilidade.

$$N = Ms \times \left(\frac{RQD}{Jn} \right) \times Js \times \left(\frac{Jn}{Ja} \right) \quad (\text{Eq. 4})$$

Ms = Resistência à compressão simples (MPa)

RQD = Rock Quality Designation (%)

Jn e Jn = Parâmetros de avaliação do Índice Q

Js = Posição relativa dos blocos inclinados em relação a direcção de extracção ($Js = 1$, significa material intacto)

Ja = Grau de alteração das diáclases

Obtido o valor do índice de escavabilidade, para um determinado maciço, deverá ser realizada uma comparação entre o valor obtido e os valores tabelados, pelo autor, de forma a obtermos informações sobre a facilidade de arranque de material do maciço.

Tabela 15 – Relação entre o índice de escavabilidade, segundo Kirsten, e as características de arranque (desmonte) de um material rochoso

Intervalo de valor do índice N	Características do arranque
1 - 10	Facilmente rapável
10 - 100	Ripagem difícil
100 - 10000	Ripagem muito difícil
1000 - 100000	Ripagem extremamente difícil / explosivos
>100000	Explosivos

3.4.2 Critérios de escavabilidade por Franklin

Outro dos métodos mais aplicados para a determinação da escavabilidade de um maciço rochoso, foi apresentado no ano de 1971 por Franklin e o seu grupo de colaboradores. Esta metodologia baseia-se em dois parâmetros, como fonte de informação, sendo eles o índice de resistência à carga pontual, muitas vezes apresentado pela expressão Is_{50} , e o espaçamento médios entre fracturas. Esta metodologia aplicada por Franklin, devido aos parâmetros escolhidos é muito dependente da amostragem realizada, sendo essencial a recolha de testemunhos cilíndricos, através a amostragem por corte, para a obtenção ideal dos referidos parâmetros. Contudo, para contrariar a dependência destes dois parâmetros, existe a possibilidade de relaciona-los com outros parâmetros: o RQD com o espaçamento médio entre as fracturas e o Is_{50} com a resistência à compressão simples e com o número de Schmidt.

Na posse dos parâmetros referidos, podemos obter informação sobre o método de escavação mais eficiente e aconselhável pelo autor para o maciço rochoso, baseado na sua escavabilidade. No seguinte gráfico, apresentado na Figura 11, é possível observar quatro zonas, dependentes dos valores dos parâmetros do método, em que cada uma delas representa uma metodologia de escavação do maciço.

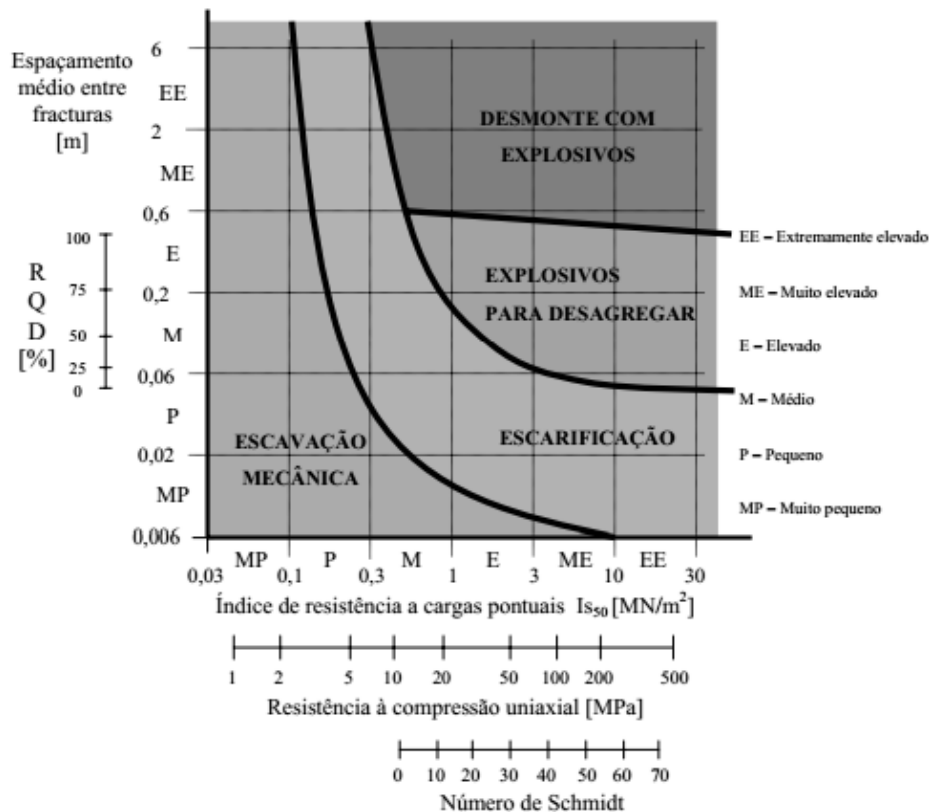


Figura 11 – Relação entre a escavabilidade e seus parâmetros, segundo Franklin, e os métodos de desmonte de um maciço rochoso (Franklin et al, 1971)

Como observado, principalmente, pelo estudo dos métodos de Kirsten e Franklin, a escavabilidade para projectos de escavação e construção de túneis é uma característica do maciço muito importante e um complemento, a não descartar, das classificações, tanto geológicas como geomecânicas, anteriormente apresentadas. Através da escavabilidade é nos possível obter conhecimento, segundo cada autor, sobre o melhor método de escavação de túneis, o que se pode tornar uma arma importante no planeamento de todo o projecto. É importante referir, que as metodologias apresentadas mais pormenorizadamente, já apresentam alguma idade, principalmente a de Franklin com mais de 40 anos, por isso os métodos de escavação propostos por eles poderão não ser os mais eficientes na actualidade, pois graças a evolução dos equipamentos e tecnologias tem existido um grande avanço na escavação de túneis em macios rochosos, contudo estes métodos não deixaram de ser uma fonte de informação importante.

3.5 EMPOLAMENTO

Para além do conhecimento, do maciço rochoso em estudo, das características geológicas, geomecânicas e da sua escavabilidade, uma das características essenciais do maciço rochoso, principalmente das rochas que o constituem, é o empolamento.

O empolamento, "*bulking*" em inglês, traduz o fenómeno de aumento do volume do material rochoso quando este é desmontado. Na projecção de um determinado desmonte de rocha, o volume teórico a desmontar é correspondente ao volume a ser cobrido pela pega de fogo, por exemplo, para o desmonte de um túnel, o volume de material teoricamente desmontado é igual à área de secção de túnel multiplicado pelo avanço provocado por determinada pega de fogo. Todavia, na realidade, o volume desmontado, que terá de ser transportado, não é semelhante ao volume teórico, mas sim superior. Esta discrepância entre o volume teórico e o volume real de material desmontado é resultado da desagregação da rocha irregularmente, que não permite que cada bloco/partícula se agrupe regularmente, criando-se espaços vazios entre cada bloco/partícula. Sendo esta agrupação irregular, do material desmontado, o responsável pela discrepância entre o volume teórico e o volume real, através da criação dos vazios.

O empolamento torna-se um fenómeno muito importante para um projecto como a escavação de um túnel, pois neste tipo de projectos movimentações de rochas são inevitáveis, seja por equipamentos de carregamento ou de transporte. A importância deve-se a que quando se realiza uma previsão de um projecto deste género, é importante conhecer-se qual será o volume de material que terá de ser movido, por ciclo de trabalho, e a partir dessa informação realizar dimensionamentos de frotas de equipamentos. Se conjecturarmos que a projecção e todo o dimensionamento da frota são realizados com base num volume a ser transportado semelhante ao volume teórico, seriam criados grandes problemas, que obrigariam a um maior trabalho por parte dos equipamentos, levando a uma maior duração dessa actividade. Em caso extremos, poderia obrigar a uma total renovação da frota durante o projecto, levando a paragens nos trabalhos e a um novo investimento. Portanto, um conhecimento do volume real a ser transportado é essencial, o que torna fundamental o conhecimento do factor de empolamento do material rochoso.

O empolamento apresenta também uma importância, a quando a escolha do local onde será realizada a escombreira, com o material desmontado. Se o local para receber a escombreira, for seleccionado levando em conta apenas o volume teórico total removido, durante todo o projecto, poderia levar a grandes problemas, principalmente, o local seleccionado não conseguir armazenar todo o volume de material desmontado, equivalente ao volume real durante todo o projecto.

O factor de empolamento, relacionador dos volumes teóricos e reais, do material rochoso é alvo de um grande estudo pela comunidade científica, existindo várias expressões, que se adequarão melhor a diferentes materiais. Um das expressões mais simples é a Equação 5:

$$E = \frac{V_{real}}{V_{teorico}} - 1 \quad (\text{Eq. 5})$$

Graças aos casos de estudo e à investigação por todo o Mundo, valores médios do factor de empolamento para as rochas mais conhecidas estão tabelados, contudo é importante referir que os valores presentes na Tabela 16 poderão não ser concordantes com a realidade, pois o empolamento apresenta vários factores influenciadores, sendo os principais:

- Tipo de rocha
- Características geológicas
- Características geomecânicas
- Método de fragmentação (desmonte por explosivos, remoção mecânica, britagem, etc.)
- Características da fragmentação

Tabela 16 –Valores do empolamento de diferentes materiais rochosos, por López Jimeno (2003)

Tipo Rocha		Factor de Empolamento
Ígneas	Diorito	1.5
	Gabro	1.6
	Granito	1.6
	Basalto	1.6
	Riólito	1.5
Sedimentar	Calcário	1.55
	Arenito	1.5
	Dolomito	1.6
Metamórfica	Mármore	1.6
	Quartzito	1.55
	Xisto	1.6
	Ardósia	1.5

Para exemplificar o fenómeno de empolamento, no caso se realizarmos o desmonte de um maciço rochoso apenas de granito, em que o volume teórico é de 200 metros cúbicos, o volume real desmonte e a ser movimentado é de, caso o factor de empolamento seja de 80 %:

$$0.80 = \frac{V_{real}}{200} - 1 \therefore V_{real} = 200 \times (1 + 0.80) = 360 \text{ m}^3$$

Como podemos observar pelo exemplo anterior, existe uma diferença significativa entre o volume teórico e o real, que senão é levada em conta poderá originar grandes problemas num projecto.

3.6 CONCLUSÃO

Como podemos observar, a informação sobre o maciço rochoso é extremamente importante para projecto como a escavação de túneis, pois este será o local de trabalho. A obtenção das informações necessárias pode ser realizada através de vários métodos de investigação, seja *in-situ* ou em laboratório, servindo de base para o estudo e caracterização do maciço. Para a sua classificação, podemos observar que existe várias classificações, apresentado por diversos autores, como a classificação geológica e a classificação geomecânica, sendo esta ultima constituída por diversas classificações, de autorias diferentes, sendo as mais relevantes o RMR e o Índice Q. Para além de classificação do maciço, segundo as diferentes metodologias, o conhecimento sobre as características de escavabilidade e empolamento, do maciço, são essenciais para a escavação de túneis e para a projecção de frotas de equipamentos, respectivamente. Resumidamente para um projecto de escavação de um túnel o maciço deverá ser alvo de uma estudo hidrológico e geológico intenso, acompanhado pela sua classificação geológica, classificação geomecânica e identificação das suas propriedades, nomeadamente a sua escavabilidade e empolamento. Para o *utilitário*, não serão utilizadas todas as formas de estudo mencionadas, pois algumas delas, não serão especificamente relevantes.

Das classificações apresentadas, a geológica será descartada devido a não se relacionar com as características geotécnicas do maciço. Sendo as classificações geomecânicas as aplicadas, nomeadamente o RMR, devido á sua maior difusão em Portugal.

Ao nível da escavabilidade, tal como a classificação geológica, não será utilizada no *software*, pois como observado uma das grandes vantagens deste parâmetro, é poder servir de base para a escolha do método de escavação de túnel (se por explosivo, se por desmonte mecânico, etc.), porém como referido, o *software* será direccionado exclusivamente para o desmonte com explosivos, logo o parâmetro escavabilidade poderá ser descartado.

Quanto ao empolamento, este parâmetro será incluído, devido a sua grande relevância para o cálculo de volumes a ser movidos pelos equipamentos, de remoção e transporte.

Pelo exposto, dos estudos e caracterizações importantes sobre o maciço, apenas a classificação geomecânica, mais precisamente o RMR, e o empolamento são essenciais para o funcionamento do utilitário informático.

4. METODOLOGIAS DE ESCAVAÇÃO DE TÚNEIS

4.1 INTRODUÇÃO

A escavação de túneis, como referido, tem sido realizada ao longo da história, com uma significativa evolução dos métodos de escavação. No passado esta escavação realizava-se de uma forma muito rudimentar, através do trabalho manual de centenas de operários, que em muitos casos apenas estavam equipados com picaretas e pás, contudo, no presente tal forma de escavação é extremamente rara de ser encontrada, seja devido aos seus problemas de eficiência, de longa duração e de má qualidade de trabalho e saúde para os operários. Com a missão de melhorar todos os aspectos e trabalhos relacionados com a escavação de túneis, o Homem investiu no desenvolvimento e investigação de novos métodos a serem aplicados, bem como equipamentos e ferramentas que podem ser uma mais-valia. Esta constante evolução e busca pela perfeição levaram até aos dois principais métodos de escavação, na actualidade: o método mecânico e o método com uso de explosivos.

A selecção entre o tipo de metodologia a adoptar é condicionada por um grande número de factores, sendo muitas vezes uma escolha complexa. Como observado a caracterização da escavabilidade de um maciço rochoso poderá ser uma ferramenta para a escolha do método a ser empregue, contudo os métodos apresentados pelos autores como Kirsten e Franklin, como referido encontram-se um pouco desactualizados em relação às características dos instrumentos e equipamentos actuais. Para além da sua desactualização, a escavabilidade não considera factores importantíssimos quando realiza as suas recomendações, como as características ambientais, geográficas e económicas do projecto. Como tal, a escavabilidade não poderá ser a única base de escolha do método de escavação de um túnel, devendo-se ser contabilizados outros factores, principalmente:

- Características geológicas e geomecânicas
- Condições hidrológicas
- Características do túnel: comprimento, dimensão da sua face, geometria, etc.
- Restrições de vibrações
- Exigências do projecto (prazos, etc.)
- Factores ambientais
- Factores económicos
- Localização do túnel (próximo a habitações, locais de sensibilidade estrutural alta, etc.)

Vários autores apresentam diferentes formas de selecção do método a aplicar, focando-se num pequeno número de parâmetros de fácil identificação, sendo a resistência à compressão

uniaxial o parâmetro mais utilizado. Nas seguintes imagens podemos observar, a aplicação de diferentes métodos de escavação de túneis relacionados com os valores da resistência à compressão uniaxial do maciço (Figura 12), bem como a relação deste último parâmetro com o nível de fracturação e estabilidade (Figura 13).

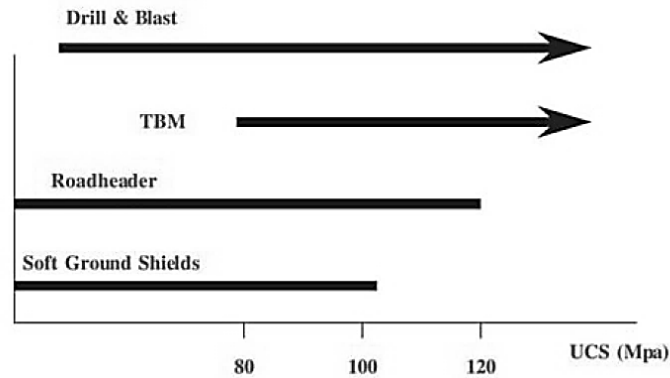


Figura 12 – Relação entre os métodos de escavação de túneis e o valor de resistência à compressão uniaxial do maciço rochoso (Rock Excavation Handbook Tamrock, 1999)

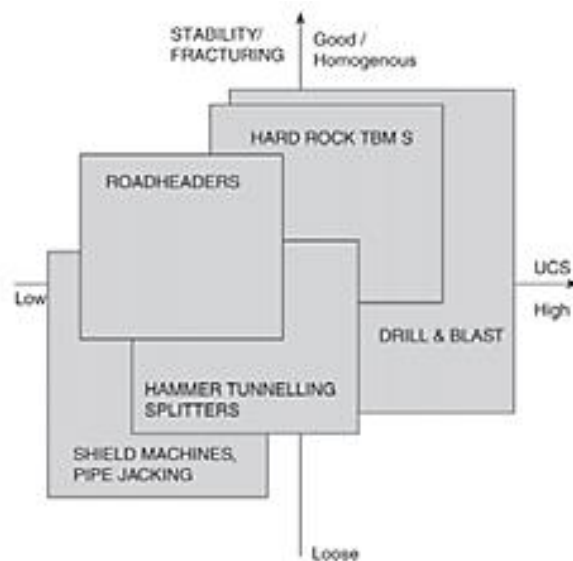


Figura 13 – Relação entre os métodos de escavação de túneis, o valor de resistência à compressão uniaxial e o estado de fracturação/estabilidade (Rock Excavation Handbook Tamrock, 1999)

Pela Figura 12, podemos observar que o método de Perfuração e Detonação (*Drill & Blast*) é, sob o ponto de vista do fabricante, aconselhável para uma grande gama de valores de resistência à compressão uniaxial, apresentando o maior campo de aplicação, em relação a

esta propriedade, comparativamente com os outros métodos de aplicação. Analisando a Figura 13, podemos observar que o método estudado nesta dissertação apresenta uma das maiores áreas de aplicação, em relação à compressão uniaxial e ao estado de fracturação, sendo preferencialmente aconselhável para situações em que o estado da fracturação é bom (homogéneo) e a resistência à compressão uniaxial é elevada.

A escavação de túneis, na actualidade, é conseguida através de diferentes métodos, dependendo de todas as características mencionadas anteriormente. Esses métodos podem ser agrupados em duas categorias, uma englobando aqueles métodos que utilizam explosivos para realizar o desmorte do maciço rochoso e outros que realizam o desmorte mecânico do maciço. Entre os dois grupos existem grandes diferenças, o que é importante para projectos deste género, pois um determinado maciço rochoso, muito dificilmente, não terá um método eficiente que se adapte às suas características. Como já referido, esta dissertação será focada na escavação de túneis pelo emprego de explosivos, porém, seguidamente será realizada uma pequena apresentação, não só desta metodologia, mas também de outros dos principais métodos de escavação de túneis na actualidade.

4.2 ESCAVAÇÃO DE TÚNEIS COM O USO DE EXPLOSIVOS

Este método de construção envolve a utilização de explosivos, para realizar o desmorte, sendo que é muitas vezes designado como o método de Perfuração e Detonação. Os explosivos utilizados são colocados dentro de furos previamente furados por equipamentos especializados, como observável na Figura 14. A disposição na frente de desmorte dos furos, os seus comprimentos e diâmetros, bem como o tipo de explosivo e a sua quantidade dependem do tipo de material rochoso em que se está a trabalhar. A operação de detonação dos explosivos é cuidadosamente preparada, com o apoio de retardos temporais, de forma a tornar o desmorte eficiente e seguro. Após realizado o desmorte, o material rochoso fragmentado tem de ser removido e carregado por vários equipamentos, de forma a se poder aceder a uma nova frente de desmorte livre, de modo a que se possam realizar as várias operações referidas anteriormente. Estas operações são repetidas, como exemplificado na Figura 15, até o túnel atingir o seu objectivo. Uma das grandes exigências desta técnica de escavação é a organização e execução de cada uma das operações, pois a construção do túnel no menor tempo possível e com o menor custo, depende da eficiência de todas as operações. Para além do grande campo de aplicabilidade deste método, que permite realizar a escavação de túneis em todo o tipo de maciços rochosos, realizando-se as adaptações recomendadas, outras características são:

- Aplicável a uma grande gama de condições do maciço rochoso
- Início rápido do projecto

Utilitário de Apoio à Estimação de Parâmetros na Escavação de Túneis

- Custo ao nível de equipamento relativamente baixo comparado com outros métodos
- Potenciais impactos ambientais, como poeiras, ruído e visuais, são reduzidos, confinando-se à área próxima a frente de desmonte.
- Os períodos de tempo de vibração são menores, porém os valores atingidos poderão ser maiores, comparativamente com o método mecânico utilizando tuneladoras



Figura 14 – Equipamento de perfuração realizando a sua operação, num túnel aberto pelo método Perfuração e Detonação

(<http://www.urbantransport-technology.com/features/featurebreaking-new-ground-with-the-brenner-base-tunnel/featurebreaking-new-ground-with-the-brenner-base-tunnel-1.html>)

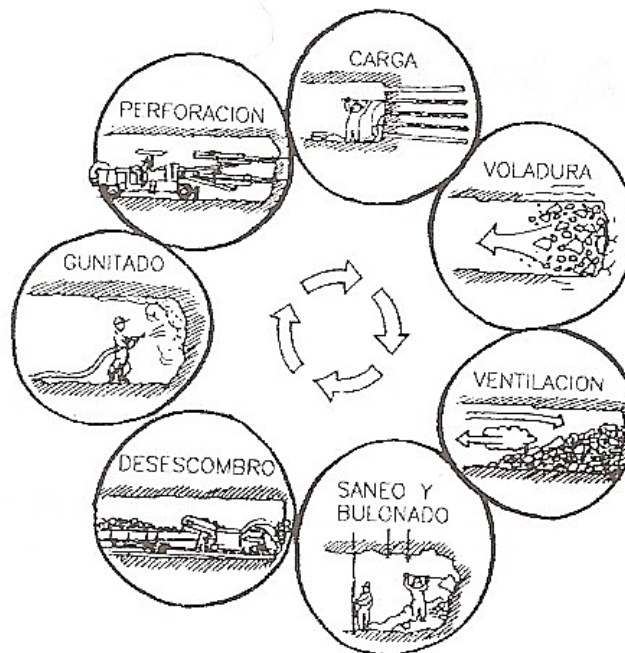


Figura 15 – Sequência de trabalhos realizados na escavação de um túnel, pelo método de Perfuração e Detonação (López Jimeno, 2003)

4.3 ESCAVAÇÃO MECÂNICA

4.3.1 Por tuneladoras

Esta técnica de escavação trata-se de um desmonte mecânico, em que são utilizados equipamentos designados por *Tunnel Boring Machine* (Tuneladora), que realiza a abertura do túnel de forma integral, isto é, por secção plena.

Este método não utiliza explosivos, sendo um método de desmonte mecânico, estando o seu desempenho muito influenciado com as características do maciço rochoso e com a escolha do equipamento TBM. Preferencialmente o maciço rochoso deverá ser constituído por rochas competentes e que ofereçam estabilidade, sem suporte. Sendo apontado por López Jimeno e Diaz Méndez, que a eficiência deste método é superior quando a resistência a compressão do maciço é inferior a 120 MPa. Contudo se as rochas forem extremamente duras, a utilização das tuneladoras pode ser uma desvantagem, podendo tornar o processo lento, ineficiente e caro. Quando o maciço apresenta alta dureza é muitas vezes aconselhável a utilização do método Perfuração e Detonação.

As tuneladoras, como exemplificado na imagem, apresentam grandes dimensões, e uma forma cilíndrica, tal como observado na Figura 16. Uma das suas faces realiza a escavação do túnel, através da abrasão de cabeças no material rochoso. Alguns destes equipamentos possibilitam a colocação de sustimento imediato, à medida que a escavação do túnel avança.



Figura 16 – Duas perspectivas dos equipamentos TBM (tuneladoras)
(www.oobject.com/category/20-interesting-boring-machines)

4.3.2 Por equipamentos de “ataque pontual”

Tal como as tuneladoras, estes equipamentos são utilizados para a escavação mecânica de túneis, contudo não permitem uma escavação em secção plena. A utilização destes equipamentos é aconselhável para a escavação em maciços rochosos pouco abrasivos, com grande fracturação e que possuam uma resistência à compressão entre os 80 e os 120 MPa.

Enquanto as tuneladoras, são muito semelhantes, não se diferenciando muito do seu corpo cilíndrico, as máquinas de “ataque pontual” são comercializadas numa maior variedade de designs, de forma a responder da melhor maneira às exigências dos projectos. Na Figura 17, podemos observar uma máquina de “ataque pontual” comercializada pela Sandvik, bem como a cabeça de um destes equipamentos a realizar o desmonte de um maciço.



Figura 17 – Duas perspectivas das máquinas de ataque pontual: 1º equipamento da Sandvik; 2º Braço do equipamento desmontando material rochoso (<http://www.fhwa.dot.gov/bridge/tunnel/pubs/nhi09010/09.cfm>)

Dentro do desmonte mecânico, poderão ser aplicadas ainda outras técnicas de escavação, como a utilização de martelos hidráulicos, retroescavadoras, contudo, estas são mais explicáveis para maciços terrosos, não sendo por isso aplicáveis em rochas e maciços rochosos.

4.4 ABORDAGENS NA ESCAVAÇÃO DE UM TÚNEL

Para além dos diferentes métodos de escavação de um túnel, dentro do método Perfuração e Detonação é possível realizar-se outra divisão, levando em conta se são criadas secções de desmonte dentro da mesma pega de fogo. Existem três principais técnicas, sendo elas:

4.4.1 Desmonte por secção plena

Neste tipo de técnica, a frente do túnel é desmontada apenas com uma pega de fogo, como observado na Figura 18. Esta técnica é principalmente aconselhável para túneis, num maciço de boa qualidade com uma altura até os 10 metros, nestes casos é-se possível desmontar túneis com áreas de secção que podem chegar até aos 100 metros quadradas.

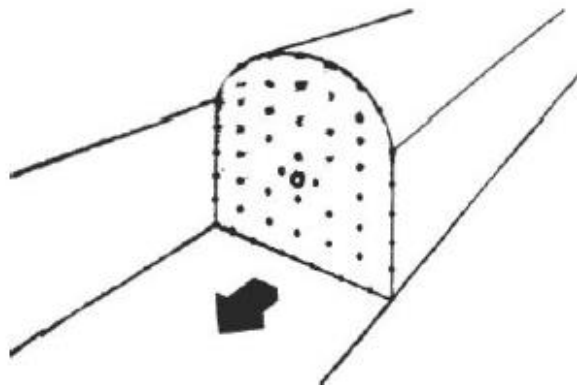


Figura 18 – Esquema de avanço de um túnel pelo desmonte por secção plena (Bhandari. 1997)

4.4.2 Abóboda e Soleira

Nesta técnica, o desmonte é realizado em duas fases, realizando a divisão entre a fase de desmonte da abóboda do túnel e da soleira, tal como observado na Figura 19. A relação entre duas secções depende da área total da secção do túnel, das dimensões dos equipamentos e o tipo de rocha.

Ao nível da ordem de detonação, não existe nenhuma regra específica, podendo as suas ordens alternar, porém a secção da abóboda costuma ser a primeira a ser desmontada. Na Figura 19 podemos observar o esquema de um desmonte por abóboda e soleira, em que a abóboda é a primeira secção a ser desmontada. Depois de o topo ser desmontado, o desmonte da soleira, torna-se mais simples, pois foi criada uma nova face livre, podendo ser realizado por furos horizontais ou verticais, como observado. As situações em que a soleira é desmontada em primeiro lugar, ocorrem com menor frequência, devido às grandes exigências quanto a qualidade do maciço rochoso a desmontar.

Comparativamente com o desmonte de secção plena, esta técnica exige muito mais tempo para o desmonte, devido a divisão por secções.

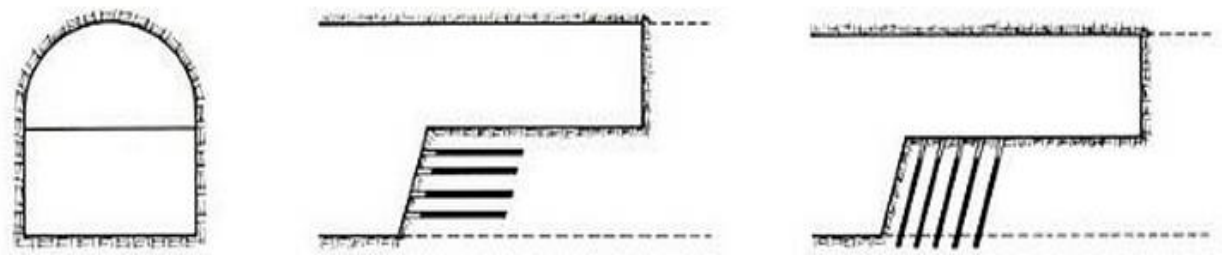


Figura 19 – Esquema da frente de um túnel, pelo abordagem Abóboda e Soleira (López Jimeno, 2003)

4.4.3 Abertura de um túnel piloto

Esta técnica caracteriza-se pela abertura de um túnel piloto na face do túnel, podendo este estar situado na parte superior da face ou no centro.

Quando o túnel piloto é realizado na parte superior da face, este apresenta um comprimento entre os 35% e os 40% da área da secção do túnel. Como vantagem, esta técnica, possibilita o estudo do maciço que vai ser encontrado com o avançar das escavações, contudo a construção do túnel piloto e o constante alargamento deste até as dimensões desejadas do túnel são operações muito demoradas. Esta técnica tem sido empregue com bastante êxito em túneis com áreas de secção não superiores a 50 metros quadrados. Na Figura 20, está representada uma sequência de escavação de um túnel pela abordagem de túnel piloto

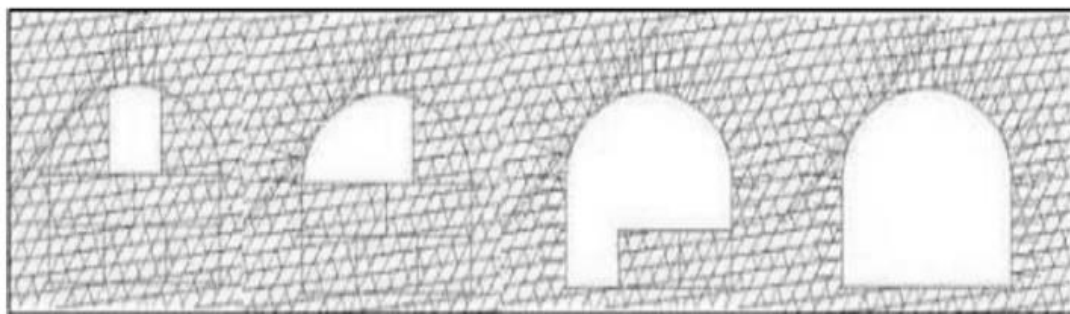


Figura 20 – Sequência de trabalhos, na escavação de um túnel por túnel piloto (Costa, B. 2012)

4.5 CONCLUSÃO

Como podemos observar, a escavação de túneis poderá ser realizada de diferentes maneiras, dependendo das várias características e condicionantes existentes. Poderão ser aplicados métodos mecânicos ou com usos de explosivos, que ofereceram diferentes resultados dependendo das condições de aplicação. A escolha do melhor método a ser utilizado é extremamente importante para o projecto, pois será a base para definir tempos de projecto, custos, entre outros, desta forma a sua escolha deverá ser bem sustentada e pensada, pois após iniciado um projecto, a alteração do método de escavação levará a grandes custos e atrasos.

Cada um dos métodos apresentados, entre outros não abordados, apresenta-se eficiente para um determinado leque de características geológicas, devendo ser a escolha do método de escavação focalizado nessas características. Contudo como referido anteriormente, na maioria das vezes um maciço rochoso não é totalmente homogéneo, apresentando na sua extensão diferentes características geológicas, que formam diferentes zonamentos geológicas dentro do mesmo maciço. Quando estes zonamentos são significativos, apresentando uma grande heterogeneidade, podem ser aplicados métodos diferentes para cada uma dessas zonas, levando a que diferentes tramos do túnel, correspondentes a zonas geológicas diferentes, sejam escavados por métodos de escavação distintos. A utilização de diferentes métodos num túnel, teoricamente levará a um maior investimento e custo do projecto, contudo quando se tratam de túneis com dimensões consideráveis e com exigências apertadas, a aplicação de vários métodos deverá ser levada em conta, de forma a realizar a escavação do túnel com maior qualidade e eficiência e em menor tempo.

Os pressupostos referidos anteriormente, poderão também ser aplicados ao tipo de abordagem na escavação, isto é, se a escavação do túnel será realizada em secção plena ou em diferentes secções. Tal como um determinado túnel poderá ser explorado, viavelmente e eficazmente, por dois métodos diferentes, a mesma situação poderá ocorrer com as abordagens nessa escavação, isto é, nada impossibilita que diferentes abordagens sejam aplicadas, desde que devidamente pensadas e escolhidas, de forma a aumentar a eficiência da escavação do túnel e a diminuir o tempo de projecto.

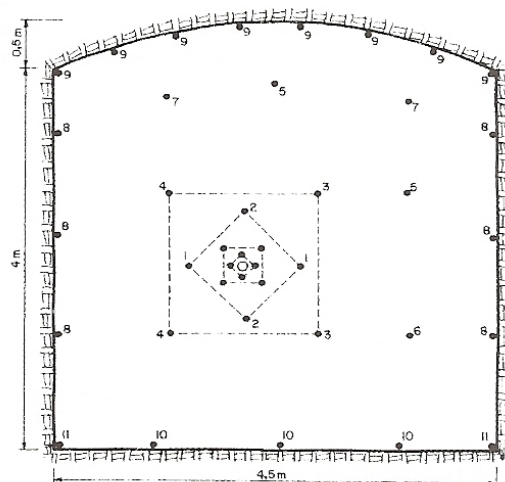
Apesar de terem sido referidos diferentes métodos de escavação, este trabalho será focado exclusivamente no método Furação e Detonação, em que são empregues explosivos para a escavação do túnel, sendo que a única abordagem a ser considerada nesta dissertação será a de Secção Plena.

5. DIAGRAMA DE PEGA DE FOGO

5.1 INTRODUÇÃO

Como observado, no método Perfuração e Detonação, por secção plena, o desmonte do maciço rochoso, que originará a escavação, é efectuada pela detonação de explosivos, localizados em orifícios previamente furados na rocha. O conjunto de furos, designados no seu todo por pega de fogo, não poderão ser realizados sem um intensivo estudo e análise, com o objectivo de determinar todas as suas características previamente, desde os seus diâmetros, número, localização na frente, espaçamento entre si, sem falar de todas as escolhas relativas aos explosivos que gerarão o desmonte. Toda a esta informação é compilada num único local, a que na Engenharia de Minas se designa como Diagrama da Pega de Fogo. A construção deste diagrama é o ponto de partida de qualquer túnel aberto pelo método o Perfuração e Detonação, e leva em conta todas as características do projecto e do maciço rochoso.

Previamente ao início das operações de construção de túnel, com o emprego de explosivos em furos de perfuração, é necessário o dimensionamento e desenho do diagrama de pega de fogo. Um diagrama de pega de fogo trata-se então de um diagrama, representativo da frente de desmonte do túnel em causa, com toda a informação necessária sobre os furos, como a localização e dimensões, que terão de ser perfurados. Para além da informação sobre os furos, os diagramas completam-se com informações sobre os explosivos e acessórios, que será analisado mais à frente. Na Figura 21 podemos observar o exemplo de um diagrama de fogo, para um determinado túnel.



• Contorno hastiales: 6 barrenos ($6 \cdot 3,20$) = 19,20 kg.

• Destroza: 5 barrenos ($5 \cdot 3,20$) = 16,00 kg.

Carga total de la voladura	= 11,16 kg
Superficie del túnel	= 19,5 m ²
Avance	= 3 m
Volumen de roca arrancado	= 58,5 m ³
Consumo específico de explosivo	= 1,9 kg/m ³
Número total de barrenos	= 40
Longitud total perforada	= 128 m
Perforación específica	= 2,2 m/m ³

Figura 21 – Exemplo de um diagrama de fogo, para a escavação de um túnel (López Jimeno, 2003)

Como se constata, para além da representação esquemática da frente do túnel, com as suas dimensões, podemos visualizar a localização dos furos, que irão receber o explosivo, bem como as temporizações de detonação. Tal como previamente referido, complementado o esquema da frente de desmonte, é fornecida a informação sobre a quantidade de explosivo a ser utilizado na pega de fogo, informações sobre a perfuração do maciço e o volume de rocha desmontado, entre outros dados úteis e necessários.

Num diagrama de fogo, para o método de Perfuração e Detonação, um das estruturas mais importantes são os furos, que serão perfurados na frente de desmonte. Os furos de um diagrama são agrupados em categorias ou grupos, em função das suas localizações e da sua finalidade na pega de fogo. Os principais grupos de furos dentro de uma pega de fogo são: caldeira, alargamento, soleira e contorno, tal como exemplificado na Figura 22.

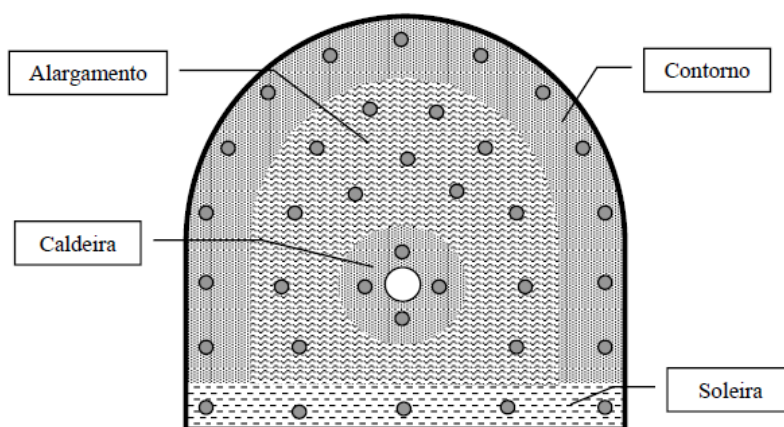


Figura 22 – Frente de desmonte de um túnel, representando os diferentes grupos de furos (Salgueiro, J. 2011)

Os desmontes subterrâneos, como o método Perfuração e Detonação para túneis, são caracterizados por apenas possuírem uma frente livre, correspondente à frente do túnel, onde se realiza a perfuração e o carregamento dos explosivos. Esta situação obriga a que o desmonte seja realizado de forma a serem criadas novas faces livres, de forma constante. Uma das estratégias mais aplicadas e comuns para a frente livre adicional, é abrindo-se uma caldeira, normalmente no centro da face do túnel.

A caldeira é constituída por vários grupos de furos, geralmente com uma posição central, na frente do túnel. Esta estrutura apresenta uma grande importância em todo o processo de escavação de um túnel, pois como referido, será ela a responsável pela criação de uma face livre adicional, necessária para o correcto desmonte maciço. Considerando o número, tamanho e posição dos furos é possível classificar as caldeiras em dois grupos:

- **Caldeira com furos em paralelo:** Neste tipo de caldeira, todos os furos da pega de fogo apresentam o mesmo comprimento sendo todos paralelos, como observado na Figura 23. Parte dos furos está carregado enquanto outra parte está vazia. O posicionamento entre os furos é importantíssimo, influenciando todo o desmonte da pega de fogo. Dentro das caldeiras de furos paralelos podem ser observadas três categorias de furos, organizadas principalmente pela disposição dos furos na caldeira, sendo eles os “*burn cuts*”, os “*cylindrical cuts*” e os “*coromant cuts*”.

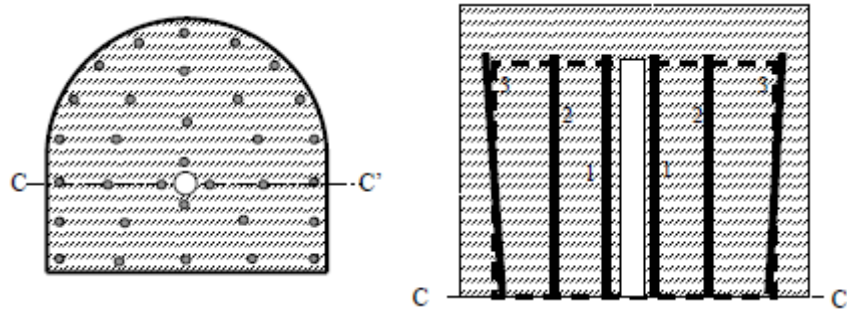


Figura 23 – Diferentes perspectivas de uma pega de fogo com uma caldeira por furos paralelos

- **Caldeiras com furos em ângulo:** Este tipo de caldeira tem sido, ao longo do tempo, abandonado, devido a serem mais trabalhosas e complexas, comparativamente com as caldeiras de furos em paralelo. Dentro deste grande grupo de caldeiras podem ser encontradas as duas seguintes técnicas:
 - Caldeiras em leque, exemplificadas na Figura 24.
 - Caldeiras em V, exemplificadas na Figura 25.

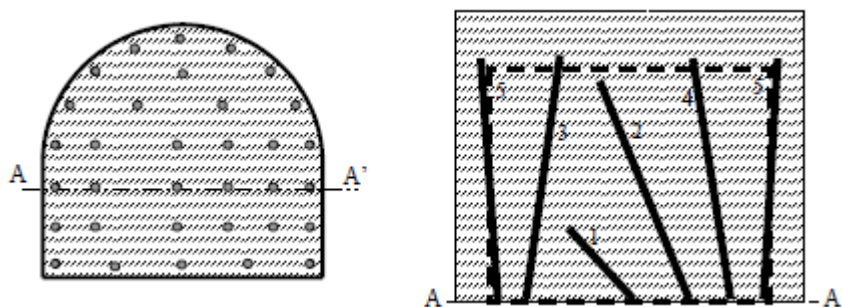


Figura 24 - Diferentes perspectivas de uma pega de fogo com caldeira por furos em leque

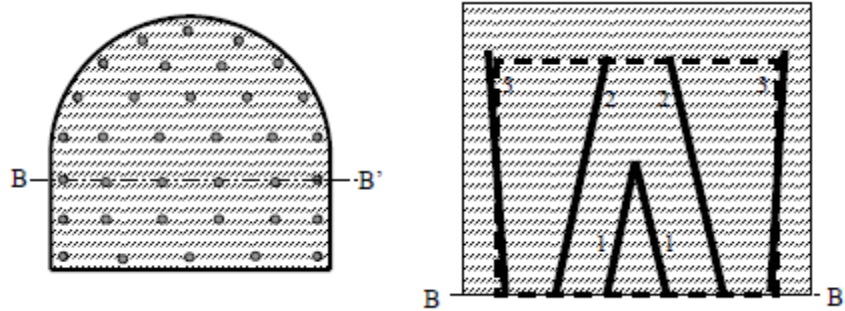


Figura 25 - Diferentes perspectivas de uma pega de fogo com caldeira por furos em V

Os furos de alargamento, são os furos que têm o objectivo de desmontar o maciço, após a detonação da caldeira. O desmonte desta área apenas é possível graças à nova face livre conseguida com o desmonte da caldeira.

Os furos de contorno são os furos que se encontram em torno da face do túnel, e são estes os responsáveis pela forma final do túnel. Da qualidade da perfuração, carregamento e detonação destes furos irá depender a forma final do túnel. Se estas actividades forem realizadas de forma defeituosa, as faces do túnel irão apresentar um perfil irregular e não liso. Para prevenir estas superfícies regulares em torno do túnel são normalmente realizadas as seguintes técnicas de prevenção:

- Reduzir o espaçamento entre estes furos
- Reduzir a concentração da carga explosiva destes furos.

Outra técnica empregue nestes furos, neste caso, para impedir que o túnel afunile, isto é que, que o túnel diminua a sua área de secção á medida que o túnel vai progredindo, é a perfuração dos furos de contorno com um pequeno ângulo e inclinação, direccionado para as paredes do túnel. Este ângulo é comumente referido com ângulo de saída e deverá ser constante em todas as pegas de fogo realizadas. Os Jumbos de perfuração mais recentes, realização um controlo destes ângulos de forma bastante precisa, ajudando os operadores nestas situações.

Os furos de soleira são os furos, que tal como os furos de contorno serão responsáveis pela forma final do túnel, porém os de soleiras estão encarregues da base do túnel. Para estes furos também é importante que a perfuração seja realizada com um ângulo de saída, de forma a evitar o afunilamento do túnel.

Ao nível da detonação, os grupos anteriormente apresentados, são detonados seguindo uma ordem específica. Como referido, os tiros de caldeira são os primeiros a ser detonados, com o objectivo que criar uma nova face livre, posteriormente é realizada a detonação dos explosivos dos furos de alargamento, sendo que os tiros de soleira e de contorno são os últimos a serem detonados.

5.2 CONSTRUÇÃO DE UM DIAGRAMA DE FOGO

Apesar de na actualidade se poder encontrar um grande número de ferramentas informáticas de apoio à construção de diagramas de fogo, todas elas se baseiam em expressões matemáticas apresentadas por diversos autores. Seguidamente serão apresentadas as linhas básicas de construção de um diagrama, fazendo-se notar que a construção de um diagrama completo exigirá uma complexidade superior.

5.2.1 Número de Furos

Primeiramente para a construção do diagrama de fogo é necessário determinar o número de furos necessários para o desmonte. Vários autores apresentaram várias fórmulas para o cálculo do número de furos, da pega de fogo, utilizando diferentes parâmetros, como a largura e altura da frente do túnel, a área da secção do túnel, o diâmetro dos furos, entre outros. Algumas das expressões mais utilizadas são apresentadas por Wilbert e de Pokrovski. Para esta dissertação será utilizada uma expressão bastante utilizada na Equação 6, que determina o número de furos, baseando-se na altura e largura da secção do túnel e no diâmetro do furo, que será carregado com explosivo.

$$N = [30.9 + (W \times H)] \times \frac{44}{d} \quad (\text{Eq. 6})$$

N = Número de furos da pega de fogo

W = Largura desejada da face do túnel, em metros

H = Altura desejada da face do túnel, em metros

d = Diâmetro do furo carregado, em milímetros

Após a determinação do número de furos do diagrama de fogo, a escolha da caldeira e das características é importante. Para esta dissertação será apenas admitido que a caldeira em causa será uma caldeira de furos paralelos. Contudo, mesmo dentro apesar de reduzir o tipo de caldeira a apenas as de furos paralelos, muitas diferenças poderão existir, seja no número de furos constituinte e na sua localização. É de referir que o dimensionamento e construção de uma caldeira, para um correcto desmonte é um dos trabalhos mais complexos e sensíveis, dentro da construção de um diagrama de fogo. Desta forma não foi incluído nesta dissertação as diferentes características que as cadeiras poderiam apresentar, devido a complexidade da sua construção e à pouca influência que apresentara para o projecto, principalmente na sua duração.

5.2.2 Comprimento da Pega de Fogo

Após a determinação do número de furos do diagrama de fogo e da construção da caldeira apropriada, um dos passos seguinte é a determinação do comprimento do furo aconselhável, que será representativo do comprimento da pega de fogo. Ao nível do *software* e do trabalho, o comprimento da pega de fogo será um parâmetro que poderá ser alterado conforme desejado, não sendo influenciado por nenhum parâmetro nem regido por nenhuma expressão, contudo para conhecimento geral, o valor do comprimento do furo poderá ser determinado traves da Equação 7.

$$H = 0.15 + (34.1 \times D) - (39.4 \times D^2) \quad (\text{Eq. 7})$$

H = Comprimento do furo

D = Diâmetro do furo vazio escolhido para a caldeira

Como será observado seguidamente, o comprimento do furo, ou da pega de fogo apresentaram uma grande influência em todo o projecto.

5.2.3 Avanço Real

Contudo, como é do conhecimento, apesar de os furos realizados apresentarem o comprimento calculado, o avanço no túnel, provocado pelo desmonte de uma pega de fogo, nunca será igual a esse valor, devido, principalmente à qualidade do maciço rochoso. Como podemos observar pela Figura 26, é de fácil compreensão que o avanço real, provocado pelo desmonte do maciço rochoso, não é concordante com o comprimento total, perfurado pelo equipamento de perfuração

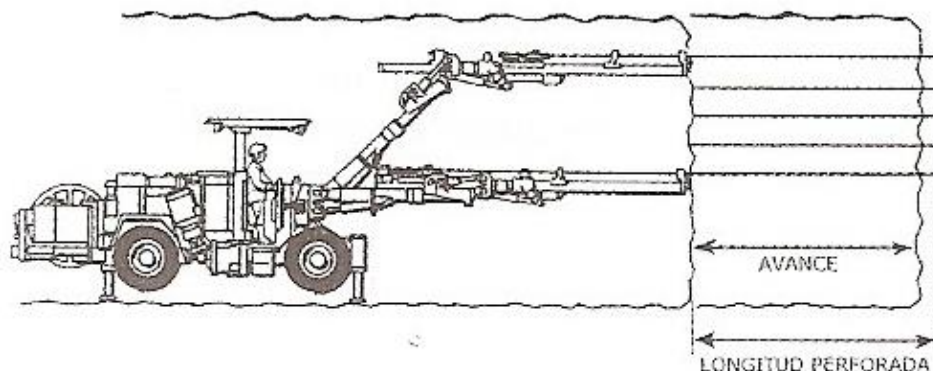


Figura 26 – Relação entre o avanço real e o comprimento total perfurado (López Jimeno, 2003)

A diferença entre o avanço real e o comprimento total perfurado, como referido, é fortemente influenciado pela geologia do maciço rochoso, sendo que, regra geral, um maciço rochoso de alta qualidade, apresentará um avanço muito próximo do comprimento do furo (da pega de fogo), sendo que um maciço de qualidade muito pobre, levará a um avanço muito reduzido, em comparação com o comprimento da pega de fogo.

Em concordância com o referido, foi adoptada uma correlação entre a classificação RMR do maciço rochoso com a percentagem de avanço em relação ao comprimento da pega de fogo.

Para a classe I, da classificação, será adoptada a percentagem mais alta, de 95%, sendo para a classe V, adoptada a percentagem menor. Ao nível da classe mais alta, que apresenta um maciço de muito boa qualidade, o avanço previsto será de 95%, não de 100%, pois este último valor é raramente atingido, pois para tal acontecer uma grande circunstâncias de factores são necessárias, como uma extrema boa qualidade do maciço e uma grande eficiência e qualidade do processo de desmonte. Na Equação 8 podemos observar, matematicamente, a relação entre o comprimento da pega de fogo e o avanço provocado.

$$AP = PA \times C^{Pega} \quad (\text{Eq. 8})$$

AP = Avanço provocado pelo desmonte da pega de fogo

PA = Percentagem de avanço, representa a eficiência do avanço provocado pelo desmonte da pega de fogo, em função da classe do maciço rochoso, segundo o RMR

C = Comprimento do furo

Sendo a percentagem de avanço, exprimida segundo a Tabela 17, em função da classificação do RMR:

Tabela 17 – Relação entre as classes RMR e a Percentagem de Avanço

Rock Mass Rating		PA (Percentagem de Avanço)
I - Muito Bom	100 - 81	95 %
II - Bom	80 - 61	80 %
III - Regular	60 - 41	70 %
IV - Pobre	40 - 21	60 %
V - Muito Pobre	21 - 0	50 %

A escolha da percentagem de avanço atribuída para cada classe de maciço não foi realizada segundo estudos intensivos nesta matéria, sendo estes valores atribuídos seguindo um raciocínio lógico e após uma longa discussão.

A escolha de uma percentagem de avanço de 95% para a classe I, é baseada na bibliografia, pois é do conhecimento que uma percentagem de avanço de 100% é considerada uma miragem ao nível do desmorte de maciços rochosos, com o uso de explosivos, para a escavação de túneis. Vários autores defendem que um avanço previsto correspondente a 95% do comprimento da pega é, na actualidade o melhor resultado possível, sendo apenas atingido para maciços de grande qualidade. Desta forma, baseado neste raciocínio, foi escolhido a percentagem de avanço de 95% para desmontes de maciços rochosos realizados em maciços rochosos de qualidade máxima, correspondentes à classe I do RMR.

Quanto à escolha do avanço previsto mínimo, de 50%, para maciços da classe V, após o dialogo com engenheiros com uma maior experiencia no assunto, foi assumido que este seria o valor que melhor se ajustaria. Ainda para esta mesma classe, a escolha de um avanço previsto inferior a 50 %, seria de rejeitar, pois levaria a uma extrema ineficiência do desmorte, pois a relação entre o comprimento da pega e o avanço previsto seria extremamente negativo, para o projecto.

Baseados os valores extremos da percentagem de avanços nos raciocínios previamente explicados, os valores intermédios foram obtidos de forma expedita, de forma a obter-se uma diferença no avanço previsto similar de classe para classe.

É importante também esclarecer, que neste caso a percentagem de avanço está apenas a ser correlacionada com a qualidade do maciço rochoso, admitindo-se que a qualidade do desmorte realizado pelo Homem, principalmente, perfuração do maciço, carregamento do explosivo e a sua detonação, não interfere neste parâmetro, através do pressuposto que este desmorte é realizado pelo Homem, com uma eficiência de 100%. Como é do conhecimento, esta eficiência por parte das operações é completamente impossível, devido a toda a variabilidade das operações e dos seus constituintes, como equipamentos e operadores, contudo para o estudo da influência da qualidade do maciço rochoso no avanço previsto, tal suposição é positivo.

Uma forma muito simples de compreender a importância do avanço previsto, para todo o projecto, é imaginando o caso de escavação de um túnel com o mesmo comprimento, por exemplo 40 metros, em maciços rochosos diferentes, imaginemos um maciço da classe I e outro da classe III, sendo que o comprimento da pega de fogo, de 5 metros, será semelhante para os dois casos. Para cada um dos casos, o número de avanços necessários, para completar a escavação do túnel, será correspondente a:

No caso do maciço de classe I: $\text{Avanços necessários} = \frac{40}{4 \times 0.95} = 8.42 \cong 9$

No caso do maciço de classe III: $\text{Avanços necessários} = \frac{40}{4 \times 0.70} = 11.42 \cong 12$

Como podemos observar, a influência da percentagem de avanço, em função das características do maciço rochoso, é muito grande, pois, como isto no exemplo anterior,

mudança na classe do maciço, leva a que sejam necessário mais 3 avanços, para completar o túnel.

5.2.4 Cálculo dos diferentes furos

Como referenciado, os furos de uma pega de fogo, são agrupados em diferentes grupos, consoante as suas características. Para a construção de um diagrama é essencial o conhecimento sobre o número de furos de cada grupo e a sua posterior localização na frente livre. Para este trabalho, a distinção entre o número de furos de cada grupo não é relevante, pois apenas o número de furos total é relevante.

A determinação do número e da posição dos furos de cada grupo é uma das tarefas mais complexas, na construção do diagrama. Vários autores, tal como ocorrer para a determinação do número de furos no seu total, apresenta variadas formas de determinação do número de furos de cada grupo e o espaçamento entre eles, de forma a determinar a sua posição na frente. Estas fórmulas apresentados, por todo o Mundo, são bastante úteis, contudo muitas das vezes não ditam o resultado final, pois as empresas que realizam este género de projectos, baseiam-se muitos nos dados e conhecimentos obtidos com a experiencia, para construir o seu diagrama de fogo, neste caso, ao nível dos diferentes grupos de furos. Para além disso, o aparecimento de vários *softwares*, veio tornar esta tarefa muito mais fácil e menos manual.

É importante referir, que na maioria dos túneis, são necessários vários diagrama de fogo para a sua construção, isto deve-se as diferentes condições e características geológicas encontradas ao longo da construção do túnel, que levam a formação de zonamentos geológicas, como já aludido. De uma zona geológica para uma zona geológica poderão ocorrer pequenas alterações no diagrama, como a pequenas alterações do número de furos de um grupos em pequena, ou o aumento ou diminuição do seu espaçamento, contudo em outros casos poderão ser exigidas alterações drásticas, como a mudança do tipo de caldeira e alterações em grandes proporções do número e localização de furos. Contudo para este trabalho será assumido que o número de furos não variará ao longo de todo o projecto. Juntamente com este pressuposto, não serão considerados os diferentes grupos de furos dentro do diagrama, o tipo ode caldearia utilizada nem a localização dos vários furos na frente de desmonte.

Resumidamente, em termos do diagrama de fogo, é para nós importante o conhecimento da metodologia para determinar o número de furos, segundo o método sueco, e o conhecimento entre a relação entre o comprimento de furo ou da pega e o avanço, em função das características do maciço rochoso, mais especificamente da sua classificação segundo o RMR.

5.3 EXPLOSIVOS

O principal objectivo da perfuração dos diferentes furos numa pega de fogo, é o acomodamento dos explosivos que irão realizar o desmonte. À operação de colocar os explosivos dentro dos furos da pega de fogo é-se comumente chamada de carregamento da pega de fogo, ou simplesmente carregamento. Esta operação é realizada segundo várias regras de segurança, como vista de protecção dos operadores, visto ser uma tarefa realizada de forma manual.

Dentro de um furo de uma pega de fogo existem duas estruturas principais: a coluna de carga explosiva e o tampão. A coluna de carga explosiva é geralmente dividida em duas secções, segundo as suas características e funções distintas. As duas divisões realizadas são:

- Coluna: Secção intermédia do furo e de maior comprimento, comparativamente com as outras secções. Tem como principal função acomodar o explosivo que irá realizar o desmonte, sendo designado geralmente como carga de coluna.
- Fundo: Secção mais afastada da boca do furo. Esta secção acomoda também explosivos, geralmente de maior potência que os utilizados na coluna, ou até mesmo boosters, de forma a realizar um desmonte, nesta área, com maior energia, devido ao seu maior confinamento. O conjunto de explosivos no fundo do furo é designado como carga de fundo. Como será observado, é nesta secção que são colocados os detonadores que irão realizar a iniciação dos explosivos.

Como compreendido é graças a estas duas secções que ocorre o desmonte da rocha, pois são estas que acomodam o explosivo. O tipo de explosivo e a sua quantidade são estabelecidos previamente, a quando a criação do diagrama de fogo, levando em conta vários factores: as características do maciço rochoso, exigências da construção, tipo de furos do diagrama de fogo, presença de estruturas físicas e humanas próximas, etc.

O tampão, por seu lado, não está presente na estrutura de um furo para fornecer energia destrutiva, sendo a sua presença essencial para realizar a selagem de todo o explosivo dentro do furo, bem como dos ases que se irão libertar após a detonação. Desta forma o explosivo, mesmo quando não detonado, não é projectado do seu furo, e a pressão originada pelos gases de detonação será transmitida com maior eficiência para o maciço rochoso. Para a realização do tamponamento, podem ser utilizadas várias matérias. Algumas empresas, comercializadoras de explosivos, fornecem também matérias próprias para realizar o tamponamento dos furos, porém estes materiais são uma agravante a nível financeiro, por isso, com o objectivo de se poupar dinheiro, é comum a utilização de matérias rochosas, já desmontadas, e solo para o tamponamento dos furos. A utilização destes materiais possibilita um criar tampões eficientes sem custos, visto os materiais utilizados serem originados por desmontes prévios.

Na Figura 27, podemos observar a estrutura de um furo horizontal, utilizado no método Perfuração e Detonação. São visíveis as localizações da carga de fundo (C), da carga de coluna (B) e a zona onde ocorre o tamponamento (A). É possível também observar-se a vermelho, o detonador e o fio de ligação, que serão responsáveis pela iniciação do explosivo, como será observado futuramente.

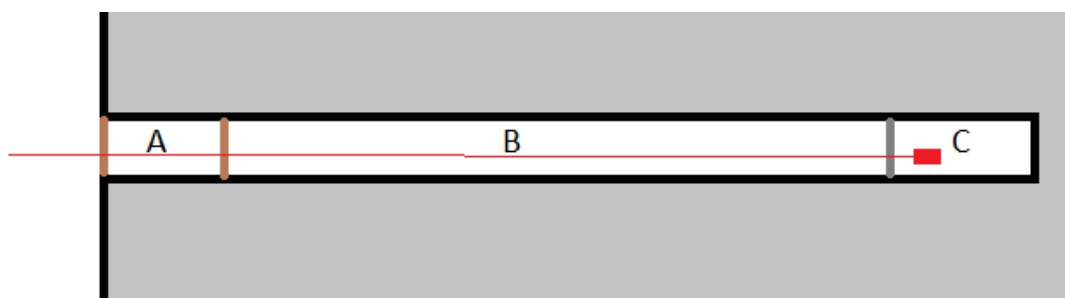


Figura 27 – Perfil esquemático de um furo, utilizado no método de Perfuração e Detonação, visualizando-se as estruturas: A-Tampão, B-Coluna e C-Fundo. A Vermelho está representada a localização do detonador.

O fornecimento de explosivos pode ser realizado em três grandes categorias: a granel, em cartuchos ou em pó. Sendo os dois primeiros tipos os principais quando se fala de desmonte horizontais, como acontece na construção de túneis.

Os explosivos a granel são explosivos no estado líquido, comercializado numa vasta gama de consistências, em que o seu carregamento é realizado com o apoio de bombas, que bombeia a o explosivo dos seus reservatórios para os furos desejados. As principais características dos explosivos granulados são:

- Possibilitam um carregamento rápido, quando comparado com os explosivos em cartucho.
- Carregamento fácil e seguro, na actualidade controlado por computadores.
- Ajustam-se totalmente ao furo, não existindo vazios entre o explosivo e as paredes do furo, como pode acontecer com os cartuchos.
- São resistentes à água, possibilitando o carregamento de furos húmidos.
- São susceptíveis à dispersão por falhas e fracturas.
- É necessária a existência de uma bomba, para efectuar o bombeamento do explosivo
- Um reservatório seguro, geralmente um veículo, é necessário para o seu transporte.

Quanto aos explosivos em cartuchos, são explosivos comercializados em forma cilíndrica, sendo que são comercializados com várias tamanhos, variando sempre o seu comprimento e raio. Uma determinada carga de coluna apresentará um determinado comprimento e diâmetro, sendo que os cartuchos escolhidos para o carregamento devem apresentar dimensões que possibilitem um enchimento o mais total possível dessa coluna. Para tal deverá

ser realizada uma escolha cuidada das dimensões dos cartuchos, tanto ao nível do seu comprimento como do seu diâmetro. Ao nível do diâmetro, os fornecedores, apresentam cartuchos com dimensões entre os 2 e 12 centímetros, enquanto o comprimento varia de forma geral entre os 12 e os 70 centímetros, contudo, devido a forte concorrência entre fornecedores e, por vezes, a grande dimensão do projecto, vários fornecedores possibilitam a customização dos cartuchos por parte dos clientes, de forma a cumprir o melhor possível os seus objectivos. Ao nível do diâmetro dos cartuchos, é prática comum escolher cartuchos que apresentam um diâmetro inferior em 10 milímetros ao diâmetro do furo em causa, enquanto na escolha do comprimento deverão ser escolhidos cartuchos que permitem a “construção” da carga de coluna com um número de cartuchos redondo, não brigando ao corte de cartuchos, que poderá ser uma prática perigosa.

De uma forma geral os explosivos encartuchados apresentam as seguintes características:

- Manuseamento mais fácil.
- Carregamento mais lento e complicado, pois inicialmente obriga a total desobstrução e limpeza do furo.
- Carregamento obriga ao uso de atacadores, para empurrar aos cartuchos para o fundo do furo, tarefa que pode ser complicada quando realizada em furos horizontais.
- Não necessita de veículos especiais nem de reservatórios próprios.

Como já referido para além dos explosivos encartuchados e a granel é possível a utilização de explosivo em pó, não sendo viável para furos horizontais. O seu carregamento, que é realizado através da injeção de ar comprimido, que pode criar vários problemas e a sua não resistência à água são os seus grandes problemas, não sendo compensadas com o seu rápido carregamento e a possibilidade de total preenchimento do furo.

5.3.1 Propriedades Explosivo

Quando se deseja realizar a escolha de explosivos, a serem empregues em desmontes de rocha, vários factores pesam, como a segurança, o seu custo e as suas propriedades. Os explosivos, para além da forma como são comercializados, apresentam variadíssimas diferenças entre si, que os tornam mais aconselháveis, ou até mesmo o contrário, para determinadas situações. Das várias características dos explosivos, a sua energia, traduzida mundialmente pelo *Relative Weight Strength* (RWS) e pelo *Relative Bulk Strength* (RBS), o seu balanço de oxigénio e a pressão de detonação são bastante importantes, pois caracterizam o próprio explosivo, contudo para além destas, as seguintes características, são também bastante importantes:

- Densidade
A densidade, como é sabido, relaciona a massa do explosivo com o seu volume. A comparação da densidade do explosivo, que a nível comercial costuma estar situada entre os 0.6 e os 1.45 g/cm³, com a densidade da água, aproximadamente de 1 g/cm³,

é muito importante na escolha do explosivo, pois é a partir desta comparação que podemos descobrir se o nosso explosivo é útil em furos com presença de água. Sendo que em caso, que a densidade é inferior, o explosivo flutuará, sendo bastante negativo. A densidade poderá também ser uma boa fonte de controlar a granulometria do produto final de desmonte. Principalmente para desmontar material em pequenas granulometria é aconselhável o uso de explosivos mais densos

- Sensibilidade à iniciação

Diferentes explosivos possuem diferentes níveis de susceptibilidade a serem detonados. A escolha dos métodos de iniciação e a técnica a usar terá sempre de ser baseada na sensibilidade do explosivo. Ao nível de segurança, explosivos com menor sensibilidade, são preferias, pois com estes os riscos de detonação involuntária são menores.

- Gases gerados pelos explosivos

Os explosivos, devido aos diferentes compostos que os podem constituir, podem criar diferentes gases, em diferentes volumes, quando são detonados. O conhecimento sobre estes gases e os seus volumes é essencial ao nível da segurança dos operadores, principalmente em ambientes fechado, como acontece no desmonte subterrâneo, como a construção de túneis. A ventilação após a detonação de uma pega de fogo em ambiente subterrâneo dependerá sempre do volume total de gases, e suas características. Os principais gases formados são: o dióxido de carbono, oxigénio, monóxido de carbono, gás sulfídrico. O balanceamento entre os vários gases e o oxigénio originado (BO) é um bom método para avaliar o nível tóxico dos gases. Sendo que em casos perfeitos, quando o balanço é igual a zero, apenas se formariam gases não tóxicos, como o dióxido de carbono, vapor de água e nitrogénio.

- Resistência à água

Um explosivo poderá apresentar resistência à água, permitindo que este esteja exposto, durante grandes períodos de tempo, a água, sem que perda as suas características. Na escolha dos explosivos, a presença de água nos furos de uma pega de fogo deverá sempre prevista, levando à correcta escolha de explosivos.

5.3.2 Principais explosivos existentes

Para além da forma em que podem ser comercializados, no mercado existem diferentes explosivos, com diferentes características e forças explosivas, que podem ser utilizados num desmonte. A escolha do tipo de explosivo utilizado deve ser sempre realizada com sabedoria levando em conta as características rochas, as exigências do projecto, os níveis de segurança, tal como os factores económicos.

Ao longo da história vários explosivos tem sido utilizados para o desmonte de rocha, alguns com maior sucesso do que outros, contudo com o avanço dos tempos e da tecnologia o

Homem tem-se focado em encontrar e criar novos explosivos que forneçam maior energia destrutiva com maior segurança possível. Na actualidade os explosivos mais comuns são:

5.3.2.1 Explosivos gelatinosos

Os explosivos gelatinosos são no fundo a mistura entre nitroglicerina, nitrocelulose, substâncias oxidantes, combustíveis e aditivos especiais. A proporção dos diferentes componentes na mistura pode variar, fornecendo diferentes características ao explosivo, contudo as gelatinas actuais são constituídas por uma percentagem em peso de nitroglicerina e nitrocelulose que varia entre os 30 e os 35%. Na Tabela 18 podemos observar as principais vantagens e desvantagens dos explosivos gelatinosos.

Tabela 18 – Explosivos gelatinosos: vantagens e desvantagens

Vantagens	Desvantagens
Elevada potência Elevada densidade (1,2 - 1,5 g/cm ³) Elevada velocidade de detonação (5.000 - 6.000 m/s) Seguro no fabrico e manuseio Detonação fácil Resistentes à água Quimicamente estáveis	Grande sensibilidade Acidentes ligados ao seu transporte Desaconselhável em condições ambientais extrema Elevado custo de fabrico Contêm Nitroglicerina, perigosa para o Homem

5.3.2.2 ANFO

O ANFO tem tido um papel muito importante no desmonte de rocha na actualidade. ANFO é a sigla para “Ammonium Nitrate/Fuel Oil” e como o nome sugere é uma mistura de nitrato de amónio e de gasóleo (portador de hidrocarbonetos líquidos), numa percentagem de 94% e de 6%, respectivamente. O Nitrato de Amónio é fornecido a granel, e tem como principal papel, funcionar como oxidante e a absorvente para os hidrocarbonetos líquidos. Na Figura 28, podemos observar a forma de comercialização e transporte do ANFO, que normalmente, ocorre a granel.

As grandes vantagens do ANFO é o seu baixo custo e a sua vasta gama de aplicações, sem aconselhável para rochas brandas e médias. Sendo que comparativamente com outros, o torna mais favorável é a sua não resistência à água, o que reduz significativamente a sua utilização. De um forma geral, o ANFO é caracterizado por:

- Densidade inferior à da água, cerca de 0.80 g/cm³.
- Velocidade de detonação entre os 2.900 e os 5.100 m/s.
- Libertar um volume de gases próximo dos 978 litros.

Para além do seu uso, o ANFO tem sido utilizado como composto de outras misturas explosivas, com o objectivo de obter ou melhorar características já presentes no ANFO, alguns dos explosivos fabricados a partir do ANFO são as emulsões e o ANFO pesado.



Figura 28 – Explosivo ANFO, comercializado pela MAXAM (www.maxam.net)

5.3.2.3 ANFO Pesado

O Ando pesado, como referido é um explosivo que utiliza como componente o ANFO comum, a este á adicionado uma emulsão de nitrato de amónio, que constitui entre 45 e 50% do explosivo. Esta adição de nitrato de amónio tem como objectivo aumentar a baixa densidade do ANFO. Sendo o ANFO um granulado, parte da sua estrutura é constituída por interstícios vazios, responsáveis pela sua baixa densidade. Adicionando a emulsão de nitrato de amónio ao ANFO granulado, esta irá preencher esses vazios, aumentando significativamente a densidade do explosivo. O balanceamento entre a mistura da emulsão e de ANFO comum, possibilita a variação da densidade bem como de outras características, sendo as grandes vantagens do ANFO pesado:

- Aumento da energia libertada, para uma mesma quantidade de ANFO pesado e ANFO comum.
- Aumento da sensibilidade.
- Resistência à água, algo que não acontecia com o ANFO comum.
- Possibilidade de variar as proporções da mistura, dentro de um mesmo furo.

Contudo, devido à adição da emulsão de nitrato de amónio, o custo do explosivo é superior ao do ANFO comum.

5.3.2.4 Emulsão

Tal como o ANFO pesado, as emulsões são explosivos que utilizam na sua fórmula de mistura o ANFO comum. De uma forma comum as emulsões são constituídas por 81 % de ANFO, 18% de água e 1% de emulsificante. Dependendo das proporções dos seus constituintes as emulsões podem apresentar várias consistências, contudo são utilizadas consistências que possibilitem o seu encartuchamento, melhorando o seu manuseamento. Observando a Tabela 19 podemos visualizar as principais vantagens e desvantagens das emulsões.

Tabela 19 – Emulsão: vantagens e desvantagens

Vantagens	Desvantagens
<p align="center">Baixo Custo</p> <p align="center">Baixa percentagem de fumos tóxicos</p> <p align="center">Seguros no fabrico e manuseio</p> <p align="center">Elevada velocidade de detonação (de 4.000 a 5.000 m/s)</p>	<p align="center">Sensível a temperaturas baixas</p> <p align="center">Possível contaminação quando em granel</p>

5.3.3 Factores de escolha de explosivos

Como podemos observar, através de deste supérfluo estudo dos principais explosivos, existe no mercado uma grande variedade de explosivos, podendo ser obtido o mesmo explosivo por diversas empresas fornecedoras. Este grande número de tipos de explosivos e de fornecedores, para além a possibilidade de combinação entre diferentes explosivos dentro de um furo, oferece ao utilizador uma grande variedade de opções. Desta forma a escolha acertada quanto ao explosivos ou explosivos a serem utilizados na sua pega de fogo, poderá ser complexa, tal é a variedade. Para evitar más escolhas de explosivos, tanto tecnicamente como economicamente, o utilizador deverá realizar a sua escolha seguindo, principalmente, os seguintes parâmetros:

Geologia	Custo do explosivo
Características do projecto	Diâmetro do explosivo
Volume a ser desmontado por pega	Presença de água nos furos
Condições atmosféricas	Problemas ambientais
Condições de segurança	Fumos e toxicidade
Condições de fornecimento do explosivo	

5.4 DETONADORES

Como referido os explosivos colocados no maciço rochoso serão só responsáveis pelo desmonte da rocha, através da libertação da sua energia, quando são detonados. Para ocorrer esta detonação, algum tipo de sinal tem de ser induzido ao explosivo, quando o utilizador desejar, para que esta detonação ocorra, pois caso o explosivo detona-se involuntariamente e de forma imprevista seria um grande problema de segurança para os seus manuseadores. Aos equipamentos/instrumentos responsáveis pela iniciação da detonação do explosivo designam-se de detonadores, podendo estes apresentar variadas características.

Os detonadores, como grande parte dos instrumentos e equipamentos afectos à escavação de túneis, têm sofrido grandes evoluções ao longo dos tempos, visando principalmente uma melhor eficiência de detonação e uma maior segurança. Na actualidade, quanto ao uso de detonadores, os não-eléctricos e os eléctricos serão os mais utilizados, sendo os electrónicos os detonadores mais recentes, não constituindo ainda uma grande fatia do mercado.

5.4.1 Detonadores eléctricos

Estes detonadores são actividade através de um impulso eléctrico, que viaja até si, desde o ponto onde se encontram os operadores.

Dentro dos detonadores eléctricos poderão ser criadas diferentes classes de detonadores, sendo a principal característica de organização o tempo decorrido entre o instante da iniciação, por parte dos operadores, e o momento da detonação do explosivo. Segundo esta característica, podemos dividir estes detonadores nas seguintes classes:

- Detonadores eléctricos instantâneos: Estes detonadores iniciam-se imediatamente após receberem o sinal eléctrico
- Detonadores Eléctricos Retardados
- Detonadores eléctricos microrretardador: Estes detonadores permitem atrasos na iniciação dentre 8 e 50 milissegundos, o que poderá ser bastante útil para projecto específicos.

A nível mundial, uma das grandes preocupações com os detonadores eléctricos, é a sua iniciação involuntária, devido a correntes eléctricas que possam acontecer involuntariamente, como uma trovada ou ondas rádio externas por exemplo. Para combater este grande problema de segurança dos detonadores eléctricos, tem sido fabricados detonadores eléctricos com diferentes sensibilidades à corrente eléctrica. Sendo os principais grupos:

- Detonadores de corrente baixa: estes detonadores apresentam uma alta sensibilidade, pois são activados a correntes baixas entre os 1 e 1.3 A e com impulsos entre os 3 e 5

mJ/ohm. A alta sensibilidade destes detonadores levou-os a serem proibidos nos países do Norte da Europa, como a Finlândia e a Suécia.

- Detonadores com segurança reforçada: Este tipo de detonadores eléctricos foca-se na solução do problema anteriormente referido, apresentando um impulso de iniciação entre os 120 e os 140 mJ/ohm (cerca de 30 vezes superior a classe anterior) e uma corrente de iniciação entre 3 e 4 A, também superior.
- Detonadores de corrente alta: Estes detonadores, comparativamente com as outras classes são aqueles que apresentam maiores níveis de segurança, pois a corrente de iniciação é de aproximadamente 35 A e o impulso de 2500 MJ/ohm

Para a iniciar todo o processo de detonação é necessário produzir-se um primeiro impulso eléctrico, que será levado a todos os detonadores. Esta corrente eléctrica pode ser gerada por diferentes equipamentos, como geradores ou capacitadores de descarga

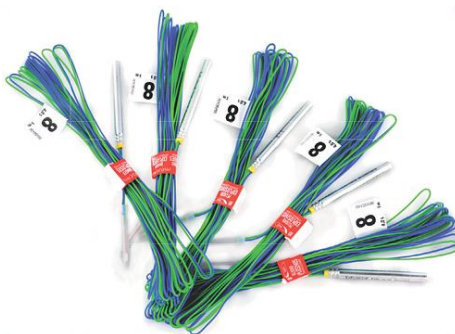


Figura 29 – Detonadores eléctricos, comercializados pela MAXAM (www.maxam.net)

5.4.2 Detonadores não-eléctricos

Como o nome indica, estes detonadores não são iniciados através de uma corrente eléctrica, sendo o sinal de iniciação uma onda de choque. Estes detonadores, comparativamente com os eléctricos, não apresentam problemas de insegurança ao nível da iniciação involuntária quando em contacto com correntes eléctricas ou ondas rádio externas. Para projectos específicos, a utilização de detonadores não eléctricos é a melhor solução, sendo muitas vezes o único método possível graças as suas seguintes características:

- Resistência à água, sobre altas pressões
- Silencioso
- Insensível a correntes eléctricas e ondas rádio externas
- Insensível ao calor e choque

Estes detonadores apresentam na sua estrutura um número de componentes superiores aos dos detonadores eléctricos, como é possível observar na imagem. O tubo de plástico do

detonador é revestido finamente com uma substância reactiva, que tem como missão transmitir a onda de choque de uma das pontas do tubo até a ponta oposta, onde poderá existir um elemento retardador, para realizar a detonação do explosivo. A onda de choque inicial no detonador não-eléctrico, é originada por cordel detonante, que realiza a ligação entre os operadores e todos os detonadores.



Figura 30 – Detonadores não-eléctricos, comercializados pela MAXAM (www.maxam.net)

Na maioria das ocasiões, uma pega de fogo iniciada por detonadores não eléctricos exige o aumento dos tempos de atraso de iniciação. Este atraso desejado é atingido com a aplicação de umas peças plásticas, designados de retardos, no cordel detonante de ligação dos detonadores, que irão realizar os atrasos desejados. Estes retardos, são comercializados em várias cores correspondentes aos atrasos que podem criar, e são colocados no exterior do furo a ser detonado. A MAXAM por exemplo, entre vários dos seus produtos, comercializa os retardos, observáveis na Figura 31, de cor amarela e vermelha, que apresentaram valores de atraso diferentes.

Ao nível da construção de uma pega de fogo, utilizando detonadores eléctricos, o seu tempo é consideravelmente superior quando comparado com pegas que utilizam detonadores não-eléctricos.



Figura 31 – Retardos, comercializados pela MAXAM (www.maxam.net)

5.4.3 Detonadores electrónicos

Como referido, estes detonadores, são os mais recentes a ser comercializados, sendo uma resposta as exigências e necessidades da precisão de detonação, que influenciará a eficiência do desmorte a geração de vibrações. As principais características destes detonadores são:

- Possibilidade de pequenos tempos de atraso, até 1 milissegundo
- Atraso máximos de mais de 6 segundos
- Iniciação apenas é realizada após introdução de uma password
- Os detonadores por si só não possuem energia para realizar a iniciação
- Energia para a iniciação é fornecida pelo equipamento de detonação
- Possuem protecção contra altas voltagens
- Preços elevados

Apesar das grandes vantagens deste tipo de detonadores, a sua utilização ainda é muito reduzida, principalmente devido ao seu custo, desta forma, para este trabalho, serão focados principalmente os detonadores eléctricos e os não-eléctricos.

5.5 BOOSTER

Estes equipamentos, podem ser considerados como acessórios de uma pega de fogo, pois a sua utilização não é obrigatória, sendo apenas necessária para ocasiões específicas. Os boosters, são principalmente utilizados como carga de fundo, devido a sua alta energia, porém poderão ser colocados ao longo da carga de coluna. Eles apresentam uma forma cilíndrica, como observado na Figura 32, sendo que quando utilizados como carga de fundo, são conectados ao detonador, que quando se inicia, detona o booster, e este o explosivo. O booster poderá ser um bom substituo de cargas de fundo constituídas por explosivos mais potentes.



Figura 32 – Boosters, comercializados pela MAXAM (www.maxam.net)

5.6 CONCLUSÃO

Como podemos compreender, apesar de um estudo superficial, a construção de um diagrama de fogo é um trabalho complexo e sensível, baseado em vários parâmetros do projecto, que no mínimo. Obriga à realização de escolhas importantes nos seguintes pontos:

- Número de furos
- Posição dos furos
- Explosivo
- Detonadores
- Temporização das detonações
- Acessórios

Juntamente com a complexidade de escolha em cada um dos parâmetros anteriores, está presente uma responsabilidade elevada, pois todo o projecto estará dependente da pega de fogo e da sua eficiência. O que parece uma pequena estrutura no seu início, apresenta uma grande influência na duração do projecto, nos seus custos e nos níveis de segurança. Desta forma, a construção de uma pega de fogo não deverá ser realizada sem um intensivo estudo de todas as características e condicionantes do projecto.

Para combater a complexidade na sua construção, nos últimos anos várias ferramentas informáticas têm sido criadas e apresentadas, para prestar a apoio na construção de diagramas de pega de fogo, fornecendo uma ajuda de grande qualidade.

É também importante evidenciar duas notas sobre diagramas de fogo para projecto, principalmente de escavação de túneis. Primeiramente, para um projecto de escavação de túnel, principalmente quando este apresenta uma grande extensão, um único diagrama de fogo não poderá ser suficiente para todo o projecto, pois cada diagrama é construído baseado em determinadas características geológicas, que poderão não ser constantes ao longo de todo o maciço, que o túnel atravessará. Logo é natural se observarem vários diagramas de fogo para um mesmo projecto, geralmente correspondentes ao número de zonas geológicas atravessadas pelo túnel. A outra nota importante é que, apesar de a construção de um diagrama ser um processo muito importante, este é um processo dinâmico, em função das necessidades. Estas alterações ocorrem principalmente com o estudo das pegas de fogo realizadas ao longo do projecto, pois muitas das vezes as condições previstas poderão não corresponder a realidade, seja para a positiva como para a negativa, o que poderá obrigar a alterações no diagrama de fogo, com o objectivo de o melhorar.

6. CICLO DE TRABALHO NA ESCAVAÇÃO DE UM TÚNEL

6.1 INTRODUÇÃO

Um projecto de escavação de túnel, pelo método de Perfuração e Detonação, como muitos dos projectos ligados à Engenharia de Minas, apresenta uma característica de repetibilidade de operações, significa isto que, um projecto deste género, numa perspectiva muito simplista, não é mais do que um grupo de operações que se repete sucessivamente, até que o projecto finde. Sendo o objectivo deste trabalho a estimação da duração temporal de projectos de escavação de túneis, o estudo desse grupo de operações e da sua organização no projecto torna-se fundamental, principalmente devido à simplicidade que origina.

Na comunidade mineira, o grupo de operações, que é alvo de repetição, é conhecido como ciclo de trabalho, devido a este representar a sequência de operações de trabalho que serão realizados, sendo que na sua maioria, cada uma dessas operações é dependente da que a precede. Dentro de um projecto, mais do que um ciclo de trabalho poderão ser encontrados, sendo que até mesmo dentro de uma operação poderão existir ciclos de trabalho.

O Homem, ao longo da história, teve sempre uma afinidade por ciclos de trabalho, procurando sempre dividir desta forma projectos. Tal afinidade deve-se à eficiência originada por tal organização simples e natural de operações. Pois entendido o ciclo de trabalho, base de todo o projecto, ao longo do tempo, à medida que o número de repetições aumenta, as operações tornam-se mais mecanizadas e os níveis de compreensão das operações e eficiência, por parte dos operadores, aumentam, pois estas tornam-se uma rotina.

Pelo exposto, torna-se importante conhecer o ciclo de trabalho de um projecto de escavação de um túnel, pois conhecendo a sua composição, a nível de operações, e organização, poderá ser realizado um estudo pormenorizado, com o objectivo de estimar a duração temporal de um único ciclo de trabalho, levando-nos no final à estimação temporal de todo o projecto.

O ciclo de trabalho de um projecto de escavação de túnel, pelo método de Perfuração e Detonação, poderá apresentar diversas composições e organizações, dependendo das características do maciço rochoso, das exigências do projecto e de diferentes condicionantes. Na Figura 33, podemos observar um dos ciclos de trabalho mais simples, que poderá constituir um projecto de escavação de túnel.

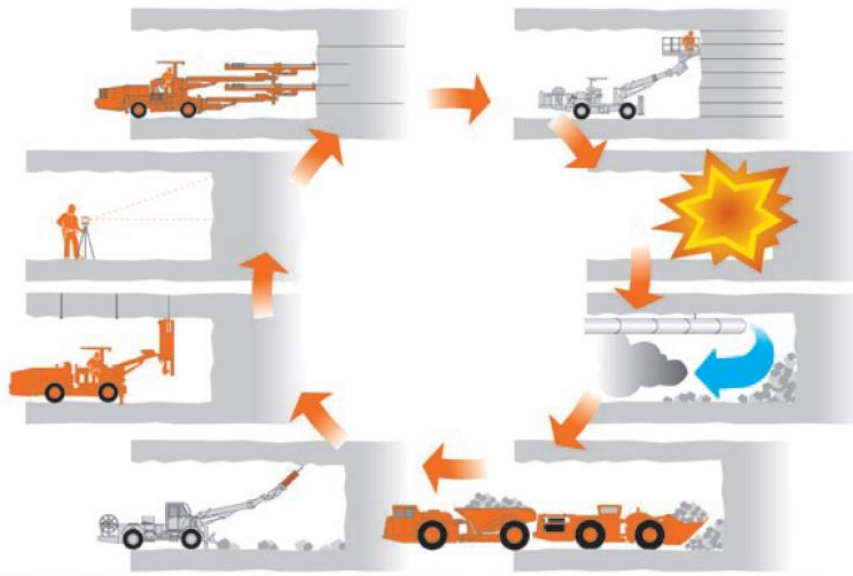


Figura 33 – Representação de uma das possíveis constituições e organizações de um ciclo de trabalho de escavação de um túnel, pelo método de Perfuração e Detonação (Rock Excavation Handbook Tamrock, 1999)

Observado a Figura 33, é possível perceber que no ciclo de trabalho apenas um pequeno grupo de operações é representado, comparativamente com todas as operações e actividades que ocorrem no projecto. Tal acontece, porque, com o propósito de determinar a duração do ciclo de trabalho, e posteriormente do projecto, apenas é necessário o estudo e contabilização das operações influenciadoras da sua duração. Desta forma para um projecto desta natureza, segundo a Figura 33, as operações contabilizadas para o ciclo de trabalho são essencialmente:

- Marcação da pega de fogo
- Carregamento da pega de fogo
- Detonação da pega de fogo
- Ventilação
- Saneamento da área desmontada
- Sustimento da área desmontada
- Remoção do material desmontado

As operações anteriormente apresentadas são as principais constituintes de um ciclo de trabalho, de um projecto de escavação de túnel e sem dúvida as mais relevantes, principalmente devido ao seu peso na duração do ciclo de trabalho. Segundo López Jimeno (2003), a nível percentual, na duração de um ciclo de trabalho, é comum as operações apresentarem diferentes pesos, como observado na Tabela 20.

Utilitário de Apoio à Estimação de Parâmetros na Escavação de Túneis

Tabela 20 – Influência das principais operações na duração de um ciclo de trabalho, segundo López Jimeno (2003)

Operações	Porcentagem
Perfuração	10 - 30
Carregamento do explosivo	5 - 15
Detonação e Ventilação	5 - 10
Remoção do material desmontado	10 - 30
Saneamento e Sustimento	70 - 15

Ainda segundo López Jimeno (2003), a situação em que o saneamento e sustimento apresentam uma maior percentagem refere-se aos casos em que o maciço rochoso escavado apresenta uma qualidade muito baixa, aconselhando o autor, a ser utilizado um método de escavação mecânico, em substituição do método de Perfuração e Detonação.

Como observado as operações prévias são efectivamente aquelas cuja duração exerce uma maior influência em todo o projecto, contudo, pequenas operações, consideradas muitas vezes secundárias, são também elas importantes para a estimação, pois apesar de representarem apenas uma pequena percentagem do tempo de duração do ciclo de trabalho, terão uma grande influência quando totalizado todo o projecto, já que serão sucessivamente repetidas. Neste caso, podemos adicionar ao ciclo de trabalho as operações:

- Chegada do Jumbo de perfuração à frente
- Ligação da pega de fogo
- Saída do pessoal

A organização de todas as operações do ciclo de trabalho é essencial para o projecto, sendo a eficiência, a qualidade e a rapidez a que cada uma delas é realizada influenciadora de todo o projecto. Como será observado mais tarde, as operações do ciclo, salvo raras excepções, realizam-se sequencialmente, não sendo possível a sua sobreposição. Esta característica leva a que a duração do ciclo dependa delas, pois serão as que efectivamente contarão para a sua duração, já que como já foi dito, serão realizadas outras actividades e trabalhos em simultâneo, que não serão influenciadoras do tempo de duração do ciclo, como é exemplo a manutenção de equipamentos, trabalhos administrativos, alimentação dos trabalhadores, etc.

Quanto às operações influenciadoras do ciclo de trabalho, podemos observar que o seu número, poderá não ser muito significativo, contudo cada uma delas apresenta uma complexidade assinalável, devido às grandes variações que podem sofrer, de projecto para projecto. Desta forma compilando as operações influenciadoras do ciclo de trabalho temos:

- Marcação da pega de fogo
- Chegada do Jumbo de perfuração à frente
- Carregamento da pega de fogo
- Ligação da pega de fogo
- Saída do pessoal

- Detonação da pega de fogo
- Ventilação
- Saneamento da área desmontada
- Sustimento da área desmontada
- Remoção do material desmontado

Porém, como já referido, esta dissertação focar-se na escavação de túneis que não necessitem de sustimento intenso, podendo este ser descartado ou realizada paralelamente com outras operações. Esta opção traduz-se na eliminação da Operação de Sustimento do ciclo de trabalho, pois a duração desta operação nunca será influenciadora do tempo de duração do ciclo de trabalho, e por consequência do projecto.

Conhecidas as operações que constituirão o ciclo de trabalho, de um projecto de escavação de túnel, será realizado o seu estudo aprofundado, de forma a podermos compreendê-las melhor, tanto como são influenciadas pelos parâmetros e características do projecto mas também como estas o influenciam.

6.2 OPERAÇÃO DE MARCAÇÃO DA PEGA DE FOGO

Nesta operação é realizada a marcação, na frente livre do túnel, as posições onde serão realizados os furos de perfuração. Esta operação é muito importante, pois da qualidade da marcação irá depender o posicionamento dos furos, sendo que pequenos erros nas suas posições, quando todos somados, poderão levar a pegas ineficientes ou perigosas.

A marcação pode ser realizada de forma manual, pelos operadores, sendo geralmente marcado na frente com tintas ou *sprays*. Os operadores recebem as posições dos furos, previamente definidas no diagrama de fogo, e tentam recriá-lo na rocha, com a maior qualidade possível, utilizando geralmente réguas e projectores. Na Figura 34 é possível observar uma sequência comum dos trabalhos de marcação de um pega de fogo, de forma manual.

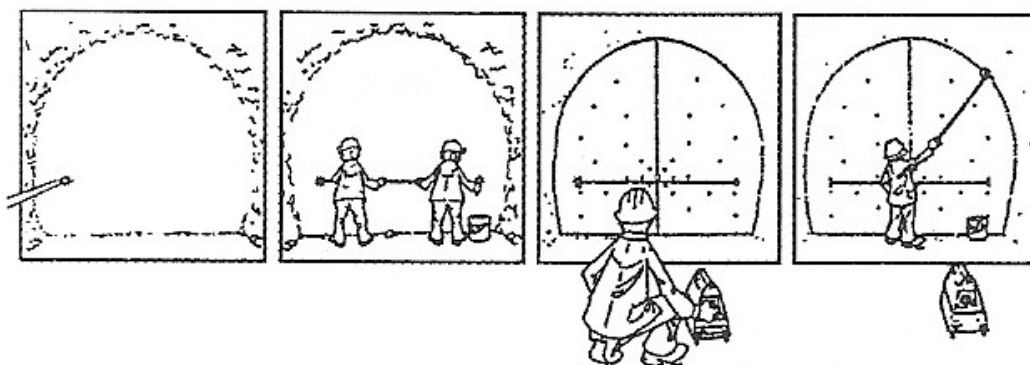


Figura 34 – Sequência de trabalhos, na marcação de uma pega de fogo manualmente (López Jimeno, 2003)

Contudo, com o avançar das tecnologias, vários equipamentos de perfuração, como os Jumbos de perfuração da última geração, apresentam *softwares* que não necessitam de marcação prévia na frente de desmonte. Fornecendo-se a estes Jumbos, em formato digital, o diagrama da pega de fogo pretendido, este irá realizar os furos nas suas determinadas posições. Com a utilização destes equipamentos mais avançados tecnologicamente é espectável que o erro referente a marcação da pega de fogo seja menor, comparado quando esta é realizada manualmente, pelos operadores.

Desta forma, para a determinação do tempo correspondente à operação de marcação, podemos obter dois valores, dependendo das características do equipamento de operação, se à seguinte pergunta “O equipamento de perfuração possui *software* de marcação automático?” a resposta for:

- ❖ “Sim”: O tempo de marcação de pega é nulo.
- ❖ “Não”: O tempo gasto para realizar a operação é uma função do número de furos a marcar, que dependem da área da secção do túnel, e do número de operadores que a realizam. Neste caso, apesar de existirem diferentes grupos de furos dentro de um diagrama de fogo, o tempo de marcação de cada grupo de furos é tomado como igual. Podemos então construir a Equação 9 para determinar o tempo que será despendido, dentro de um ciclo de trabalho, para a operação manual:

$$TM = \frac{NF \times tm_{furo}}{NO_{marc}} \quad (\text{Eq. 9})$$

TM = Tempo total despendido dentro de um ciclo de trabalho, para a operação de marcação da pega de fogo, em minutos

NF = Número total de furos a serem marcados na frente de desmonte

tm_{furo} = Tempo despendido para realizar a marcação de um único furo da pega de fogo, em minutos

NO_{marc} = Número de operadores encarregue de realizar a operação de marcação

Na Figura 35 é possível se visualizar um equipamento com *software* de marcação automática de um Jumbo de perfuração, em que o equipamento mostrado trata-se de um terminal externo, para o operador poder controlar à distância a operação.



Figura 35 – *Software* de marcação automática: TCAD da Sandvik (Rock Excavation Handbook Tamrock, 1999)

6.3 OPERAÇÃO DE CHEGADA DO JUMBO À FRENTE

Os Jumbos de perfuração são os equipamentos responsáveis pela perfuração dos maciços rochosos, segundo as directrizes do diagrama da pega de fogo. A sua presença na frente de desmonte apenas é necessária durante a Operação de Perfuração, sendo que durante o resto do ciclo de trabalho, não é utilizado, devendo a sua presença junto à frente de desmonte evitada. Quando o equipamento termina a Operação de Perfuração, é removido do local de forma a permitir o acesso à frente do túnel, por parte dos operadores e equipamentos que irão realizar as operações seguintes. Para além deste motivo, o Jumbo é também removido por motivos de segurança, principalmente para o salvaguardar de danos no momento da detonação da pega de fogo. Com o propósito de o proteger da detonação, o Jumbo é colocado a uma distância de segurança. O Jumbo, como para cada ciclo, após realizada a perfuração, é colocado a uma distância de segurança, terá de a percorrer novamente no ciclo seguinte, de forma a se aproximar da frente para a nova Operação de Perfuração.

Como podemos perceber, os movimentos de chegada e afastamento do Jumbo, em relação à frente, repetem-se em todos os ciclos de trabalho, logo a sua contabilização, para a duração do ciclo de trabalho poderá ser importante. E como veremos seguidamente, um desses movimentos torna-se relevante temporalmente.

Comecemos pelo afastamento do Jumbo. Este movimento não é contabilizado para o ciclo de trabalho, pois para além de ocorrer em simultâneo com as operações seguintes (carregamento, ligação e saída do pessoal), não tem grande influência no tráfego dentro do túnel, pois deixando a frente livre, não prejudicará as operações seguintes. Desta forma, para o ciclo de trabalho, podemos esquecer este movimento do Jumbo, visto não apresentar uma relevância temporal para o ciclo de trabalho.

Contrariamente ao movimento anterior do Jumbo, a sua chegada à frente, apresenta uma importância significativa para todo o ciclo, devido a característica que a precede bem como a que se realiza em simultâneo.

Focar-nos-emos primeiramente nas actividades precedentes, a carga e o transporte. Ambas as actividades, como será visto mais tarde, são realizadas por equipamentos de grande dimensões, semelhantes as do Jumbo de perfuração, e que necessitam de grandes área de movimentação, principalmente os equipamentos de transporte, que se movimentam ao longo de todo o túnel. Como é de supor, devido às dimensões dos equipamentos, para que as operações de carga e de transporte sejam realizadas eficientemente e em segurança, é essencial que o Jumbo não se encontre no túnel, de forma a obstruir o mesmo, logo terá de ser removido do túnel ou então estacionado em algum nicho do túnel. Este movimento de retirada do Jumbo ocorre após o término da operação de perfuração, sendo que apenas poderá iniciar o movimento de chegada à frente quando as actividades de transporte e carga terminem, não sendo compatíveis temporalmente.

Por outro lado, iniciando-se no instante em que terminam as actividades de carga e transporte, tal como a chegada do Jumbo à frente, ocorrerá a marcação da pega de fogo na frente, caso esta seja realizada manualmente. Esta simultaneidade das duas operações ocorre, pois enquanto o Jumbo chega à frente, os operadores poderão realizar a marcação sem interferências, pois não haverá trabalhos na frente do túnel. Ocorrendo esta possibilidade de simultaneidade de operações, é importante definir as duas situações que poderão ocorrer, levando a uma variação da importância da Operação de Chegada do Jumbo à frente, em função das características do Jumbo, principalmente se este possui *software* de marcação automática da Pega de Fogo.

Caso a resposta a seguinte pergunta: “O equipamento de perfuração possui *software* de marcação automático?” seja:

- ❖ **“Não”**: Neste caso a operação de marcação da Pega de fogo, existirá, sendo realizada manualmente pelos operadores, logo existirá uma sobreposição temporal das duas operações. Como veremos mais tarde, para a contabilização da duração total de um ciclo de trabalho será admitida, entre a operação de Marcação e de Chegada do Jumbo, aquela que apresente uma maior duração. Caso o Tempo de Marcação seja superior, a Operação de Chegada do Jumbo não apresenta importância para o ciclo, podendo ser descartada, pois será considerada uma operação secundária.
- ❖ **“Sim”**: Como não existirá a Operação de Marcação da Pega de Fogo, os ciclos de trabalho iniciar-se-ão com a chegada do Jumbo à frente. Nesta situação esta operação apresenta uma importância muito superior à anterior, pois será sempre ela a definir o tempo despendido, no início de cada ciclo.

Independentemente da situação que possa ocorrer num determinado projecto, o tempo despendido na operação é poderá ser determinado da mesma forma, podendo ser traduzido pela Equação 10.

$$TJ = \frac{DS}{v_{jumbo}} \quad (\text{Eq. 10})$$

TJ = Tempo despendido na Operação Chegada do Jumbo à frente

DS = Distância de segurança a que o Jumbo deverá estar do local onde ocorrerá a detonação de explosivo

v_{jumbo} = Velocidade de deslocação do Jumbo

Como podemos perceber a determinação do tempo de duração desta operação é bastante simples, comparativamente com expressões de cálculo para outras operações.

Para a obtenção de dados sobre a velocidade de deslocação do Jumbo não existem grandes dificuldades, pois junto do comerciante ou fabricante do equipamento podemos obter esses dados. Sendo que a velocidade do equipamento pode ser baseada em experiências anteriores, onde o Jumbo tenha sido utilizado noutros trabalhos.

Quanto à distância de segurança, a que o Jumbo deverá estar do local de detonação, poderá existir uma discrepância entre valores, seja de projectos para projectos ou até mesmo aconselháveis pelo fabricante. Contudo, uma distância de segurança entre os 400 e os 500 metros é uma distância aceitável, caso o túnel se apresente como uma linha recta.

6.4 OPERAÇÃO DE PERFURAÇÃO

A operação precedente à marcação da pega de fogo, caso exista a necessidade de ser realizada manualmente, é a perfuração da frente de desmonte. Estas operações tem como objectivo a realização de furos, de determinada profundidade, diâmetro e inclinação, para que estes possam receber o explosivo a ser utilizado no desmonte. Antecedendo ao método de determinação da duração temporal da operação, será realizada uma breve apresentação de alguns equipamentos e regras, que apresentam relevância para a operação e consequentemente para a sua duração no ciclo de trabalho.

6.4.1 Equipamentos e Regras de Perfuração

6.4.1.1 Jumbos de Perfuração

No passado a perfuração da rocha, para pegas de fogo, era uma operação realizada por martelos pneumáticos, carregados pelos operadores, que como é-se possível imaginar, eram bastante ineficientes e perigosos. Contudo, com a evolução da tecnologia, a operação de perfuração, na engenharia de minas, que engloba a perfuração subterrânea, teve um grande avanço, levando a processos mais rápidos, eficientes e seguros, fundamentalmente devido ao aparecimento dos Jumbos de Perfuração. Os Jumbos de perfuração, como visualizado na Figura 36, são equipamentos, geralmente sobre rodas, que apresentam braços frontais, geralmente entre um e quatro, onde podem ser colocados martelos de perfuração, que poderão realizar a perfuração simultaneamente. O aparecimento dos Jumbos de Perfuração levou a uma grande desumanização da operação de perfuração, pois deixou de ser necessário que os operadores carregassem e segurassem os martelos de perfuração, evitando as grandes vibrações provocadas pela perfuração.



Figura 36 – Exemplo de um Jumbo de Perfuração, comercializado pela Atlas Copco (www.atlascopco.pt)

A escolha dos Jumbos, devido à sua importância para a operação de Perfuração e todo o projecto, deve ser bem estudada pois, para além da grande variedade de modelos existentes,

existem ainda várias empresas fornecedoras destes equipamentos. Na escolha de um Jumbo os principais factores em conta são, evidentemente o seu custo e a eficiência com que este realizar a furação, já que é esta a sua principal tarefa, contudo também é preferível um equipamento com grande facilidade de se adaptar a alterações de condições de trabalho, como:

- Alterações das geometrias do túnel e da face de desmonte
- Curvatura do túnel
- Alterações das características geológicas
- Alterações das características do terreno
- Variações do gradiente do túnel
- Alterações das características dos furos (diâmetro e comprimento)
- Alterações na rede eléctrica de abastecimento

Para além do seu custo, eficiência e adaptabilidade, é prática comum realizar-se a escolha dos equipamentos, de perfuração, carga e transporte do escombros, do mesmo fornecedor ou com uma compatibilidade muito próxima, pois estes equipamentos, principalmente em projectos longos, necessitam de manutenção e reparações com alguma frequência, que deverão ser realizados com alguma frequência, logo se os equipamentos, ao nível da sua mecânica, forem compatíveis, permitirá que um mesmo grupo de operadores, realize essas actividades para todos os equipamentos.

Como podemos observar a escolha do Jumbo a ser empregue deverá ser bem estudada, seguindo várias linhas de pensamento, devendo também ser uma escolha baseada em trabalhos anteriores e em ligação com o fornecedor pretendido. Para além da escolha do equipamento, o número de braços de perfuração que este possuirá é também extremamente relevante. Como referido estes equipamentos poderão apresentar diferentes números de braços, muito semelhantes aos esquematizados na Figura 37, em que serão acoplados martelos de perfuração, que poderão realizar a perfuração simultaneamente. Logicamente quanto maior for o número de braços, e por consequência de martelos, menor será o tempo da operação, contudo é importante referir que o numero de braços do equipamento deverá ser ajustado ao as dimensões do túnel, pois deverá permitir a movimentação destes. Para além das características do túnel, estes equipamentos, com muitos braços, exigem uma grande experiência por parte do operador do equipamento ou então um *software* que controle todos os braços eficientemente.

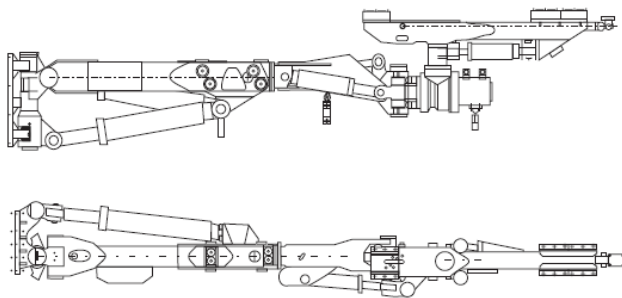


Figura 37 – Esquema de um braço de um Jumbo de perfuração (Rock Excavation Handbook Tamrock, 1999)

A utilização de Jumbos totalmente computadorizados é o futuro da indústria, sendo que os operadores terão como função supervisionar os trabalhos e intervir caso seja necessário. A computadorização mais comum, nos nossos dias, é a marcação automática da pega de fogo e o controlo dos braços de perfuração, contudo cada vez mais os Jumbos são equipamentos de recolha de informação, obtendo todo o tipo de informação sobre os furos que realizam, como comprimento, ângulo e diâmetros, com grande precisão.

6.4.1.2 Martelos

Os martelos de Perfuração, possuem um papel fundamental na perfuração de rocha, pois são estes equipamentos que produzem a energia empregada na fragmentação do material. Dentro dos martelos de perfuração, os mais utilizados na indústria mineira são os designados *Top-hammer*, assim chamados devido à fonte de energia estar localizada no topo das hastes, ou simplesmente, fora do furo a ser furado.

Quanto ao tipo de martelo de perfuração, poderão ser encontrados, principalmente dois tipos de martelo: os pneumáticos e os hidráulicos. Os martelos pneumáticos, cujo funcionamento é realizado através do uso de ar comprimido, têm vindo a cair em desuso, desde a década de 80. Quando este tipo de martelos é empregue, é comum observar extensas tubagens para transporte do ar comprimido até ao martelo ou até mesmo compressores pneumáticos portáteis. A grande queda da utilização dos martelos pneumáticos, deve-se à introdução dos martelos hidráulicos no mercado, oferecendo grande eficiência e mecanização na operação. Como é do conhecimento, um sistema hidráulico baseia-se na utilização da água, em vez de ar comprimido. Na seguinte tabela, Tabela 21, serão apresentadas as principais características dos dois sistemas:

Utilitário de Apoio à Estimação de Parâmetros na Escavação de Túneis

Tabela 21 – Comparação entre os sistemas pneumático e hidráulico, de perfuração

Sistema Pneumático	Sistema Hidráulico
Ineficiente	Eficiente
Baixa capacidade	Capacidade 50% superior ao outro sistema
Eficiência dependente das condições de fornecimento do ar comprimido	Fiável, com eficiência alta e constante
Inflexível	Facilmente ajustável as condições de perfuração
Não-ergonómico	Ergonómico
Barulhento, mistura de água-ar, ambiente de trabalho desagradável, fluxos de ar frio	Ruído reduzido, sem alteração da temperatura
Pouco económico	Económico

Para além dos martelos de topo (*top-hammer*), poderão ser encontrados outros martelos, que permitem mais eficiência e resultados para casos em que os martelos de topo não poderão ser tão confiáveis.

Os Martelos fundo de furo (DTH), são martelos bastante diferentes dos anteriores, pois nestes o martelo de precursão está localizado dentro do furo a ser perfurado. Estes martelos são muito eficientes, pois graças ao componente de precursão se situar junto à rocha, existiram poucas perdas de energia percussiva ao longo das varas de perfuração, permitindo uma taxa de penetração muito alta, independentemente do comprimento do furo. Martelos deste género, apesar das suas vantagens, apresentam uma grande complexidade, pois a energia de precursão é fornecida por um sistema pneumático, sendo que a rotação, realizada no exterior do furo, é normalmente fornecida por um sistema hidráulico. Para além da complexidade dos sistemas, estes martelos apresentam grandes consumos de energia.

Realizada uma pequena apresentação sobre os martelos de perfuração que poderão ser empregues na escavação de túneis, iremos nos focar nas principais características dos martelos de perfuração, que irão influenciar toda a operação e consequentemente o ciclo de trabalho. Na operação de perfuração, vários factores são influenciadores da sua duração, sendo a grande característica influenciadora dos martelos de perfuração é a sua potência. Os fabricantes de martelos de perfuração, comercializam martelos com uma variada potência de perfuração, de forma a se melhor adaptarem às características do projecto. A potência dos martelos de perfuração apresenta-se, de forma geral, expressa em quilowatts, sendo que de uma forma geral, os martelos apresentam potências entre os 12 kW e os 25kW. Com o aumento da potência dos martelos de perfuração, aumentam duas características muito importantes para a operação, visto que quanto maior for a potência, maiores serão as velocidades de perfuração atingidas e maiores poderão ser os diâmetros a serem perfurados.

Apesar da grande variação de potências, para projectos de escavação de túneis, as potências mais utilizadas são as de 12, 16 e 18 kW, sendo que a potência de 18 kW têm visto a sua utilização crescer. Entre as três potências referidas, várias distinções poderão ser apresentadas, seja entre os martelos das diferentes potências ou mesmo entre os diferentes

modelos dentro de cada potência, porém, para esta dissertação, a abordagem da variação da velocidade com a potência e outros parâmetros é fundamental.

Os fabricantes/comerciantes de martelos de perfuração, de forma a oferecer informações, ao clientes, sobre as velocidades de penetração (velocidade de perfuração) dos diferentes martelos realizam diferentes experiências laboratoriais em que determinarão essa velocidade em função de duas variáveis: o diâmetro do furo e da geologia, em que de forma geral apresentam a velocidade de penetração em calcários, representativos de rochas moles, e em granitos, representativos de rochas dura. Nas Figura 38, Figura 39 e Figura 40 podemos observar os gráficos, apresentados pela Atlas Copco, representativos do comportamento da velocidade de penetração em função do diâmetro dos furos e da geologia, para os martelos de potência 12, 16 e 18 kW, respectivamente.

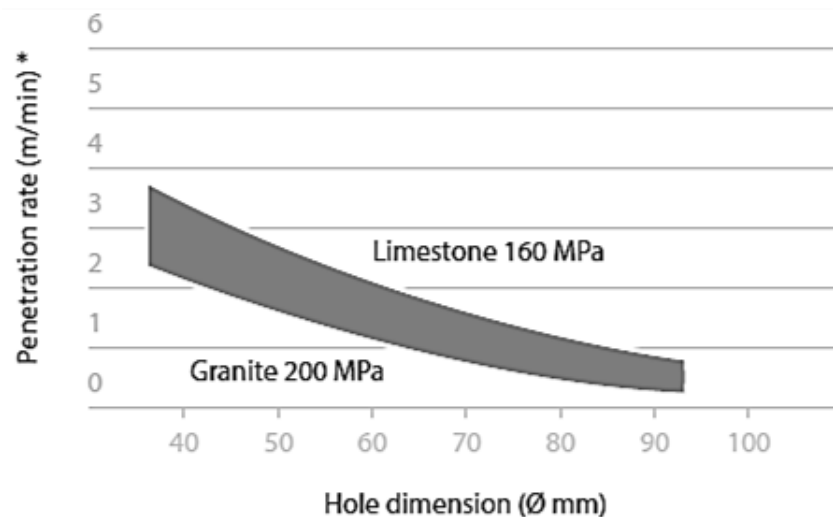


Figura 38 - Variação da velocidade de penetração, em função do diâmetro do furo, para martelos de 12kW (Atlas Copco, 2010)

Penetration rate COP 1638

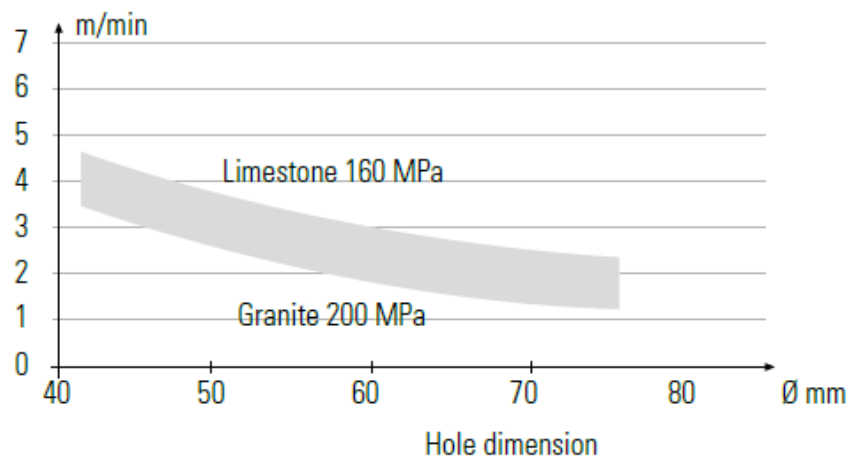


Figura 39 – Variação da velocidade de penetração, em função do diâmetro do furo, para martelos de 16kW (Atlas Copco, 2010)

Penetration rate

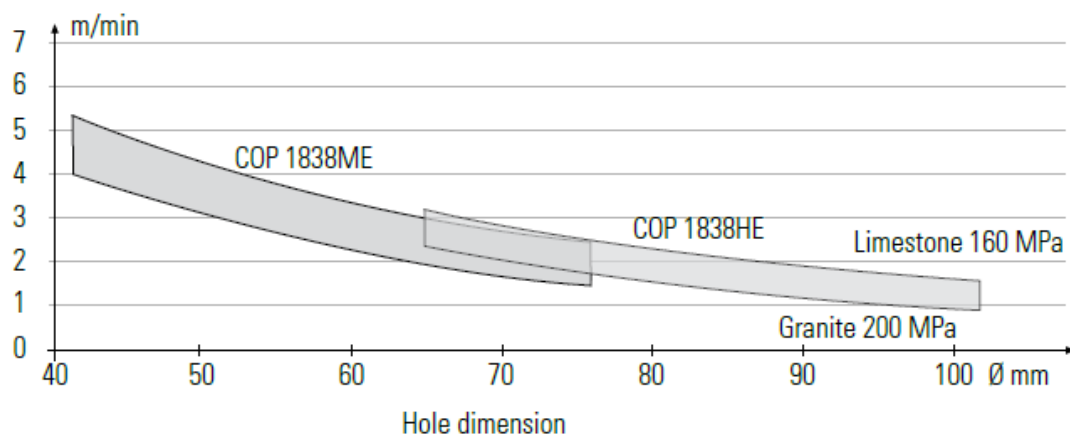


Figura 40 – Variação da velocidade de penetração, em função do diâmetro do furo, para martelos de 18kW (Atlas Copco, 2010)

Observadas as figuras anteriores, podemos observar que as velocidades de penetração apresentam valores bastante distintos, dependendo da potência dos martelos e das diferentes características de perfuração (diâmetro do furo e características do maciço rochoso), que poderão variar em grande escala a duração da operação. Compreendidos os diferentes influenciadores da velocidade de penetração, torna-se interessante realizar uma condensação destes e da sua informação, para que seja possível a sua introdução no *software* de uma forma simples, mas relevante.

Ao nível da potência, a possibilidade de escolha, no *software*, entre as três potências referidas, torna-se relevante, visto que a utilização de uma potência entre elas é a preferencial em projectos de escavação de túneis.

A introdução da influência das características do maciço rochoso torna-se importante, visto que como referido anteriormente, a geologia do maciço rochoso é o grande influenciador de todo o projecto, podendo-o até tornar inviável. Desta forma, e após o debate com um especialista na matéria da perfuração, seja como operação ou equipamentos, decidiu-se seguir o caminho de dividir a geologia, ao nível da sua dureza, nos três seguintes grupos:

- **Rochas Moles:** Material rochoso em que são atingidas as maiores velocidades de penetração. Equivalentes, como observado nas figuras anteriores, aos valores atingidos nos calcários.
- **Rochas Médias:** Rochas em que a velocidade de penetração se encontra entre a atingida para as rochas moles e as rochas duras. A nível gráfico, os valores de velocidade encontram-se entre os valores para os calcários e para os granitos.
- **Rochas Duras:** Material rochoso que fornece maior resistência a perfuração, sendo neste material que se atinge as menores velocidades. Os valores de penetração para Rochas duras são equivalentes aos obtidos para os granitos, nos gráficos anteriores.

Numa primeira perspectiva, a divisão da geologia, apenas em três grupos, poderá apresentar-se como minimalista, podendo criar dúvidas da sua representatividade ao nível das velocidades de penetração, principalmente, devido a não serem admitidas as condições de fracturação do maciço rochoso, que leva a grandes diferença na velocidade de penetração e até mesmo à paragem da operação, devido aos bits de perfuração se prenderem. Também com o especialista foi debatida esta situação, sendo que se conclui que o problema da fracturação do maciço rochoso são, na sua maioria, evitados ou corrigidos quando o operador do equipamento de perfuração é experiente ou quando os Jumbos de perfuração são modelos mais recentes, possuindo tecnologias que evitam ao máximo estes problemas, através da análise por sensores.

Importante referir, que a classificação apresentada quanto à dureza do maciço rochoso, será também ela utilizada para a quando o estudo da durabilidade do aço de perfuração.

Quanto ao diâmetro dos furos, foi possível observar que os comerciantes fornecem informações, quanto à velocidade de penetração, para valores entre os 40 e os 100 milímetros. Apesar da importância do conhecimento da variação da velocidade de penetração para uma tão larga gama de diâmetros, para projectos de escavação de túneis, tal como debatido, são preferências os diâmetros próximos aos 48 milímetros. Apesar de poderem ser utilizados outros diâmetros de perfuração, a sua diferença para diâmetros mais utilizado (48 mm) não é relativamente grande, como tal, para esta dissertação os valores da velocidade de penetração assumidos serão referentes à perfuração de furos de 48 milímetros.

Pelo exposto, na Tabela 22, podemos observar os valores de velocidade de penetração, fornecidos pela Atlas Copco, para martelos de 12, 16 e 18kW, em que são realizados furos de 48 milímetros em rochas duras, médias e moles.

Tabela 22 – Velocidades de perfuração em função da dureza da rocha e potência do martelo

Velocidade de Penetração (metros/minuto) para furos de 48 mm			
Potência	Dureza da Rocha		
	Mole	Média	Dura
12 kW	2.9	2.3	1.8
16kW	3.9	3.3	2.8
18 kW	4.5	3.9	3.3

Observada a Tabela 22, obtemos uma visão mais simples e clara da variação da velocidade de penetração para os diferentes casos possíveis. Para a utilização destes valores na dissertação, os seguintes pressupostos serão assumidos, de forma a simplificar a operações:

- Utilização de operadores experientes ou equipamentos de ponta, que evitem, na maioria, os problemas da geologia, nomeadamente a fracturação.
- A escolha do bit de perfuração foi realizada adequadamente
- Os botões dos bits de perfuração, encontram-se sempre aguçados, evitando o decréscimo da velocidade de perfuração.

6.4.1.3 Bits de perfuração

Como abordado, os martelos são os equipamentos responsáveis pela criação dos movimentos que irão realizar o desmonte, seja rotativos ou de precursão, contudo o instrumento que estará em contacto com a rocha, transmitindo-lhe essa energia, serão só bits de perfuração.

Os bits de perfuração apresentam uma imensa variedade de estilos, desde o seu tamanho, geometria e matérias constituintes. O diâmetro dos bits de perfuração é fulcral num determinado projecto, pois será com esse mesmo diâmetro que serão realizados os furos da pega de fogo, logo o diâmetro escolhido para eles deverá ser em conformidade com o escolhido no diagrama de fogo. Ao nível da sua composição, estes são normalmente de aço, sendo que na sua face, que estará em contacto com a rocha são encontrados vários botões balísticos, responsáveis pelo desgaste da rocha. Estes botões balísticos são encontrados em diferentes número e disposição, dependendo dos bits, sendo que estas características são importantes, dependendo do material rochoso em causa. Como referido anteriormente, para a manutenção da velocidade de penetração desejada, os botões dos bits deverão encontrar-se aguçados. Quando estes se encontram em mau estado deverão ser substituídos, por novos botões, para que possam ser aguçados por especialistas, de forma a serem utilizados

novamente. Quanto à sua geometria do bit bem como da disposição dos botões balísticos, poderão ser encontrados vários bits, dependendo da empresa fornecedora, contudo, transversalmente à maioria das empresas, são encontrados os seguintes bits de perfuração:

- Bit Normal (Figura 41-A): Apresenta uma forma totalmente redonda, sendo a sua face plana. Ideal para perfuração rochas como o gnaisse e o granito.
- Bit Côncavo (Figura 41-B): Neste tipo de bits a face deixa de ser lisa, tendo uma concavidade. Adequa-se para o mesmo tipo de rochas do bit normal, contudo apresenta um menor desgaste do aço.
- Bit Heavy-duty (Figura 41-C): Apresenta uma geometria similar aos bits normais, contudo a sua maior resistência, possibilita a perfuração de rochas mais duras, que contenham mais quartzo e pirite, sem um grande desgaste do aço. Poderão ser comprados com a face plana ou côncava. Nos últimos anos têm sido introduzidos bits *Extra Heavy-duty*, ainda mais resistentes que os bits *heavy-duty*.
- Bit Retraco (Figura 41-D): Estes bits apresentam ranhuras laterais, podendo ter a face plana ou côncava. As ranhuras oferecem uma grande estabilidade e direcção ao bit, permitindo a realização de furos direitos. Para além dessa vantagem, estas ranhuras são bastante úteis quando se deseja retirar o bit de furos realizados em rochas muito fracturados, em que poderá ocorrer o colapso, prendendo o bit.
- Bit inserção (Figura 41-E): Estes bits, poderão ser considerados os mais simples, apresentam na sua face uma cruz, que realiza a perfuração da rocha, essencialmente quando as exigências do furo, principalmente a sua direcção, não são muito altas.

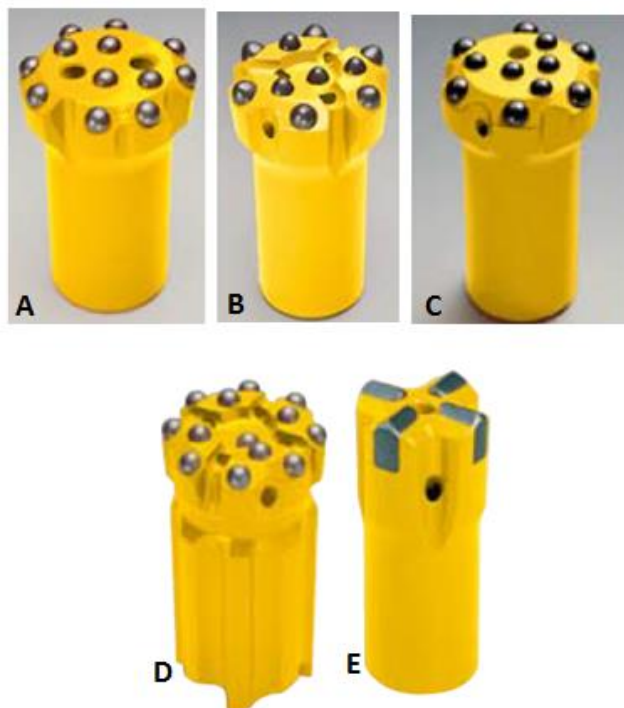


Figura 41 – Exemplo de alguns Bits de perfuração comercializados pela Atlas Copco: A- Normal; B- Côncavo; C- Heavy Duty; D- Retraco e E- Inserção (Atlas Copco, 2008)

Como podemos observar, apenas por estes cinco tipos de bits de perfuração, a variedade é muita, mesmo dentro de um mesmo fornecedor. Tal variedade ocorre devido as vantagens de cada tipo de bit oferece, e função das características do maciço rochosos, das exigências do projecto e operação de perfuração, das velocidades de perfuração desejadas, etc. Em função da geologia do maciço rochoso, fundamentalmente da sua dureza, a Atlas Copco, apresenta um diagrama que auxilia na decisão de escolha do melhor bit para a perfuração, como é possível observar na Figura 42. Como podemos ver, na escolha dos bits é a dureza da rocha é dividida em três classes, tal como realizado para esta dissertação: Dura (*Hard*), Média (*Medium*) e Mole (*Soft*).

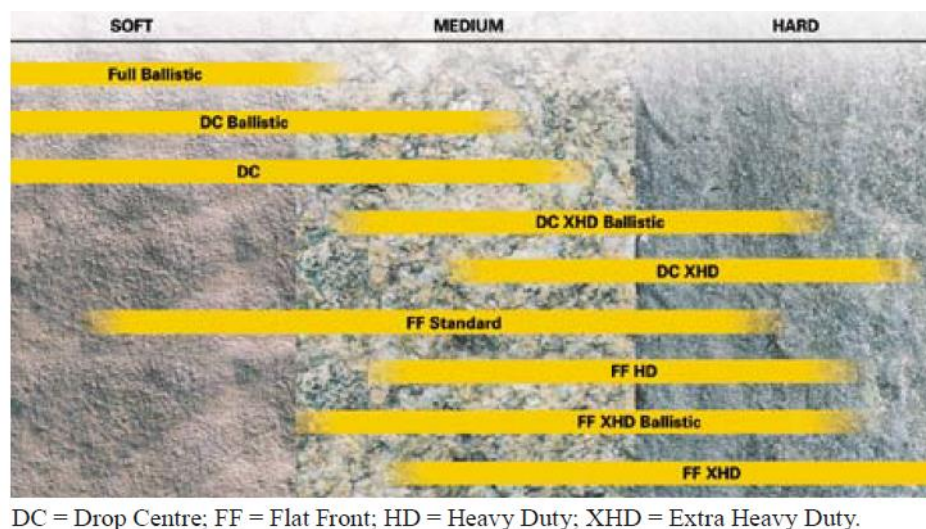


Figura 42 – Relação entre o design do Bit de perfuração e a dureza do material rochoso, segundo a Atlas Copco (Atlas Copco, 2008)

Quanto aos bits de perfuração, o seu desgaste, devido ao exigente e prolongado impacto com o material rochoso, é muito alto, comparativamente com os outros aços de perfuração. Sendo por isso, que as empresas produtoras têm realizado bastantes investimentos na investigação e desenvolvimento de bits com maior durabilidade e baratos. Do bit, no seu todo, os botões balísticos são aqueles que sofrem o maior desgaste de toda a peça, pois são eles os agentes fragmentadores. De forma geral, quando os botões são totalmente consumidos o bit deixa de ser operacional, contudo, para reduzir os custos de substituição dos bits de perfuração, tem sido aplicada uma política de substituição apenas dos botões balísticos, permitindo assim que o corpo do bit seja reaproveitado.

6.4.1.1 Hastes

Outra das ferramentas muito utilizadas na operação de perfuração são as hastes, que realizam a conexão entre o bit de perfuração e martelo, transmitindo a energia deste último até ao bit.

Comparativamente com os martelos ou bits, as hastes apresentam uma maior simplicidade técnica e estrutural, já que são comparadas com longos ferros cilíndricos. Apesar da sua simplicidade, estas ferramentas são muito importantes, pois sem elas não ocorreria avanço na perfuração do maciço, conseguido através da sucessiva conexão, ou emboquilhamento, de hastes, umas nas outras, permitindo assim o constante avanço.

O emboquilhamento entre hastes obriga a pequenas paragens na perfuração de furos, levando a que no final da perfuração de uma pega de fogo, se realizem, no total, paragens relevantes. Focando-se neste problema, as empresas fornecedoras destes produtos têm apresentado hastes com conexão rápida, que levam a paragens muito pequenas, bem como equipamentos que se colocam nos braços de perfuração dos Jumbos, que realizam a conexão entre hastes automaticamente. Estes avanços levam a gastos temporais no emboquilhamento cada vez mais reduzidos.

Ao nível da sua comercialização, estas apresentam-se no mercado numa variada gama de comprimentos e diâmetros. Ao nível do diâmetro a escolha deverá ser realizada em concordância com o diâmetro do bit, sendo geralmente o diâmetro da haste um pouco menor do que deste último. Quanto ao seu comprimento, deverá ser levado em conta o comprimento total a furar, sendo que o comprimento das hastes a utilizar deverão permitir escolher um número eficiente de hastes, isto é, por furo deverão ser utilizados o menor número de hastes possíveis, visto diminuir o tempo despendido na sua conexão.



Figura 43 – Hastes de perfuração e as suas diferentes conexões (Rock Excavation Handbook Tamrock, 1999)

6.4.1.2 Durabilidade do Aço de Perfuração

Como é do conhecimento, quando ocorre a referência ao aço de perfuração numa actividade mineira, está-se a englobar, principalmente os instrumentos que interferem nesta operação, realizando, efectivamente, a actividade de perfuração. Dentro do grupo de aço de perfuração, são englobados principalmente os bits de perfuração e as hastes, pois como observado anteriormente, tem um papel importantíssimo. Para além destes dois instrumentos, são ainda considerados as uniões das hastes, os encabadouros e os adaptadores de bits, muito utilizados para quando se pretende realizar perfurações com bits de dimensões diferentes das hastes, como ocorre na perfuração dos furos de caldeira. Na Figura 44 podemos observar, as diferentes peças e instrumentos encontrados, de forma geral, no aço de perfuração de um desmonte subterrâneo, como a escavação de um túnel. Como podemos observar existem diferentes instrumentos e peças, sendo que estão representados os seguintes: 1- adaptador de conexão entre hastes e martelo de perfuração, 2- conexões entre hastes, 3- hastes e 4- bit de perfuração.

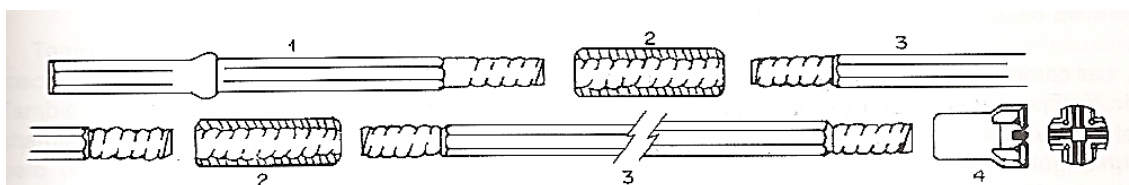


Figura 44 – Aço de perfuração: princípios instrumentos constituintes (López Jimeno, 2003)

O agrupamento destes instrumentos, afectos à operação de perfuração, e o seu estudo é extremamente importante, devido ao seu extremo desgaste, provocado pelas características das suas funções e pela extrema utilização. Dentro de todos os aços de perfuração, sem dúvida que os bits de perfuração são aqueles que são sujeitos a um desgaste mais intenso, em particular os seus botões, pois são estas as responsáveis pelo desgaste real da rocha, que originará a perfuração.

Sabendo-se que o aço de perfuração é alvo de um intensivo desgaste torna-se fundamental o seu estudo, de forma a reduzi-lo, a partir da investigação e desenvolvimento de novas tecnologias. Os comerciantes destes instrumentos, tem apresentado, ao longo do tempo diferentes instrumentos, com diferentes formas e materiais, de forma a prolongar a sua vida útil. Na indústria mineira, a vida útil dos aços de perfuração é contabilizada em metros, sendo apresentada a vida de um instrumento pelos metros que poderá furar, até à sua inutilização. Este tempo de vida depende do tipo de aço de perfuração em causa, dos materiais de fabrico, da intensidade da utilização, mas é influenciado, principalmente, pelas características do maciço rochoso a ser perfurado, sobretudo a sua dureza.

Ao nível da geologia do maciço, é facilmente perceptível, que quanto mais duro for o maciço maior será o desgaste do aço de perfuração, visto que o maciço irá exercer uma maior

resistência à sua perfuração. Desta forma, é facilmente compreensível, que quanto maior for a velocidade de perfuração, menor será o desgaste do aço de perfuração e vice-versa. Possuindo este conhecimento, não se torna descabido relacionar a vida útil do aço de perfuração com as três classes de dureza anteriormente (Mole, Média e Dura).

Ocorrendo o desgaste constante do aço de perfuração, que exige a sua substituição, para que a operação de perfuração, e consequentemente o projecto, prossiga, torna-se importante a previsão da quantidade de instrumentos, pertencentes ao aço de perfuração, que serão utilizados durante todo o projecto. Esta previsão apresenta um papel importante, principalmente a nível económico, pois durante todo um projecto as despesas relativas ao aço de perfuração poderão ser relevantes, principalmente para tuneis longos, que exigem que sejam perfurados quilómetros de perfuração.

Uma pequena nota, para o caso dos bits de perfuração, que como referido são os instrumentos que apresentam um desgaste mais intenso, principalmente os seus. Para estes instrumentos, devido aos botões se desgastarem mais rapidamente que o corpo do bit, é prática comum o aguçamento ou a substituição apenas dessas pastilhas, mantendo-se o corpo do bit. O aguçamento das patilhas, quando possível, ou a sua substituição leva a que as despesas com o aço de perfuração sejam relativamente reduzidas, bem como já referido, à manutenção dos níveis elevados de perfuração, traduzidos pela velocidade de penetração.

6.4.1.3 Regras Básicas

Quanto à perfuração efectiva do maciço rochoso, algumas “regras” são aconselhadas, baseadas no intensivo estudo e na experiencia acumulada.

Quanto ao diâmetro desses mesmos furos, existe uma variada gama de dimensões possíveis, dependendo das dimensões do bit de perfuração. Para a escolha do diâmetro a ser utilizado, o furo deverá apresentar uma dimensão suficiente para receber os explosivos eleito, porém deveser suficientemente pequeno para, não existirem espaços vazios, entre as paredes do furo e o explosivo. Estes espaços vazios são um grande problema a nível da eficiência dos explosivos, pois a quando da detonação destes, parte da sua energia é transferida para o ar nesse vazio e não para o maciço rochoso, como desejado. Ao nível dos diâmetros de furação é importante ter em conta os furos de caldeira, decididos para o nosso diagrama de fogo, pois caso a caldeira escolhida apresente furos de maior diâmetro, é necessário levar em conta os bits de perfuração para realizar os furos com o diâmetro necessário.

Outra das grandes atenções na realização da perfuração de maciços rochosos, para a escavação de túneis, é o ângulo de perfuração dos furos, principalmente dos furos de contorno. Quando se realiza a perfuração deste grupo de furos, é aplicado na sua direcção um pequeno ângulo, designado como ângulo de saída, com o objectivo de estes não serem paralelos aos demais furos, precavendo desta forma constante diminuição das dimensões do túnel, quando estes furos são realizados estritamente paralelos.

6.4.2 Determinação do Tempo de Operação de Perfuração

Conhecidos os principais equipamentos e ferramentas afectos à operação de perfuração, poderá ser realizado a estimação temporal da duração desta operação, dentro de um determinado ciclo de trabalho. A metodologia aplicada para o estudo desta operação baseia-se, inicialmente, na divisão da operação em duas actividades, que levarão à criação de dois tempos: Tempo Auxiliar e Tempo Efectivo de Perfuração.

Quando nos referimos ao Tempo Auxiliar da operação de perfuração, aludimos aos tempos despendido para além da operação “real” de perfuração. Estas operações, designadas como actividades auxiliares podem ser divididas nas seguintes actividades:

- **Emboquilhamento das hastes de perfuração:** Ocorre à medida que o furo vai aumentando o seu comprimento, sendo que a adição de novas hastes à coluna de perfuração, permite o contacto permanente do bit de perfuração com o material rochoso a perfurar.
- **Saída das hastes de perfuração:** Esta actividade ocorre após terminada a perfuração de todo o comprimento desejado, sendo que ocorre a saída de todo o aço de perfuração, de forma progressiva. Sendo retiradas as hastes de perfuração anteriormente emboquilhadas e o bit de perfuração, em último lugar.

Para cada furo o tempo auxiliar de perfuração (TP_{furo}^{aux}) será então o seguinte:

$$TP_{furo}^{aux} = \text{Tempo emboquilhamento} + \text{Tempo saída} \quad (\text{Eq. 11})$$

Estas duas operações são exigidas para a realização de cada um dos furos da pega de fogo, sendo então o número de furos da pega e o número de braços de operação os grandes influenciadores do Tempo Auxiliar.

$$TP^{aux} = \frac{NF \times TP_{furo}^{aux}}{NCP} \quad (\text{Eq. 12})$$

TP^{aux} = Tempo auxiliar despendido na operação de perfuração.

NF = Número de furos da pega de fogo.

NCP = Número de cabeças de perfuração, que realizarão a perfuração.

Quanto ao Tempo Efectivo de Perfuração, que contabiliza o tempo despendido entre o instante inicial em que se inicia a perfuração e o instante final, quando se inicia a retirada do aço, sem contabilizar as paragens referentes ao emboquilhamento de hastes, existem vários factores influenciadores, levando a que a sua expressão de cálculo apresente uma maior complexidade, relativamente ao Tempo Auxiliar. Os principais factores influenciadores do Tempo Efectivo de Perfuração são:

- Número de furos: O objectivo principal desta operação é a realização dos furos exigidos pelo diagrama de fogo, como tal, o número de furos determinados no dimensionamento da pega de fogo é um dos principais factores que pesa no tempo de perfuração. Como visto atrás, o número de furos do diagrama depende da área de secção do túnel de forma directa, por isso podemos concluir que quanto maior for a área de secção túnel, maior será o numero de furos exigido pelo diagrama de fogo, logo maior será o tempo de perfuração.
- Comprimento da Pega de fogo: Para além do número de furos, o comprimento da pega de fogo, é outros dos factores de grande peso no tempo de perfuração, quanto maior for o comprimento da pega de fogo, mais metros serão necessários perfurar por cada pega de fogo, logo maior será o tempo de realização desta operação. De uma forma geral o comprimento de pega depende da área de secção do túnel, contudo as características do maciço rochoso apresentam um papel importante. Se em certos tramos do túnel o maciço apresentar características fracas é muitas das vezes aconselhável a redução do comprimento do túnel.
- Velocidade de Perfuração: Como observado, e resumido na Tabela 22, a velocidade de perfuração poderá ser bastante distinta, dependendo de diferentes factores, sendo para esta dissertação a dureza da rocha a perfurar e a potência do martelo utilizados os influenciadores levados e conta. A velocidade de perfuração será um dos maiores influenciadores do tempo efectivo de perfuração, tal como da operação de perfuração. Como será observado, a duração da operação de Perfuração é inversamente proporcional à velocidade de perfuração.
- Número de braços de perfuração: Como referido os Jumbos de perfuração, possuem usualmente entre 1 e 4 braços de perfuração. Os braços de perfuração de um Jumbo são bastante independentes entre si, podem trabalhar em simultâneo, poupando assim bastante tempo de perfuração. O tempo de perfuração é então inversamente proporcional ao número de braços, por outras palavras, quantos mais braços o Jumbo possuir, menor será o tempo de perfuração.

Conhecidos os factores influenciadores da operação de perfuração efectiva, podemos traduzir a sua duração temporal através da Equação 13.

$$TP^{efec} = \left(\frac{NF \times C^{Pega}}{v_{perf}} \right) / NCP \quad (\text{Eq. 13})$$

TP^{efec} = Tempo despendido na perfuração efectiva, em minutos

NF = Número de furos na pega de fogo

C^{Pega} = Comprimento da pega, em metros

v_{perf} = Velocidade de perfuração, em metros por minuto

NCP = Número de braços de perfuração

Realizado o estudo teórico das actividades constituintes da operação de perfuração, bem como a sua tradução para uma linguagem matemática, torna-se possível a construção da Equação 14, que possibilita a estimação da duração temporal da Operação de Perfuração (TP).

$$TP = TP^{aux} + TP^{efec}$$

$$TP = \frac{NF \times TP_{furo}^{aux}}{NCP} + \frac{\left(\frac{NF \times C}{v_{perf}} \right)}{NCP} \quad (\text{Eq. 14})$$

6.5 OPERAÇÃO DE CARREGAMENTO DA PEGA DE FOGO

Após terminada a perfuração de todos os furos exigidos pelo diagrama de fogo, inicia-se a operação de carregamento dos furos com explosivo. A retirada do Jumbo de perfuração da frente de desmonte ocorre durante esta operação, visto ambas as operações serem compatíveis no tempo. Tal como as informações sobre número de furos e as suas determinadas posições são entregues através do diagrama de fogo as equipas de perfuração, informações sobre o tipo de carga explosiva e a quantidade que cada furo da pega deve receber são fornecidas a equipa de carregamento, que as deverá seguir precisamente

Previamente a realização do carregamento dos furos da pega de fogo é exigida, para serem evitados problemas e para serem mantidos altos os níveis de segurança e eficiência, a limpeza de todos os furos. A limpeza de um furo passa pela introdução de uma cana ao longo de todo o seu comprimento de forma a verificar se o furo não se encontra obstruído com material rochoso, que não iria possibilitar o seu correcto carregamento. Em casos de materiais de pequenas dimensões estarem no interior do furo, estes poderão ser acamados no fundo do furo ou serem retiradas para o exterior, porém nas situações em que o furo se encontra obstruído por elementos rochas de dimensões significativas, que poderão indicar alguma fractura ou abatimento de material, deverão ser tomadas medidas mais fortes, que poderão levar, em casos extremos, à inutilização do respectivo furo.

Para esta actividade da operação de carregamento, quando desejamos conhecer o tempo de limpeza de um furo, a principal variável será o comprimento do respectivo, pois a limpeza de dois furos de comprimentos diferentes não será igual. Estas diferenças de tempos de limpeza de um único furo poderá ser supérflua, contudo quando contabilizado todo esse tempo para um projecto de construção de um túnel, que exija a limpeza de inúmeros furos, será um factor importante. Sustentado no referido anterior, podemos então construir a Equação 15, que contabiliza o tempo despendido na limpeza em função do comprimento do furo, do número de furos de uma pega de fogo e evidentemente o número de operadores.

$$TC_{limp} = \frac{NF \times \left(\frac{v_{limp}}{C^{Pega}} \right)}{NO_{limp}} = \frac{NF \times C^{Pega}}{NO_{limp} \times v_{limp}} \quad (\text{Eq 15})$$

TC_{limp} = Tempo despendido na limpeza dos furos, dentro da operação de carregamento, para uma pega de fogo, em minutos.

C^{Pega} = Comprimento da pega de fogo, em metros.

NF = Número de furos da pega de fogo.

v_{limp} = Velocidade de limpeza, em metros de furo por minuto.

NO_{limp} = Número de operadores afectos à operação de carregamento.

Realizada a limpeza dos furos da pega de fogo, o carregamento desta, com explosivo, poderá ser realizado conforme as especificações.

Como observado anteriormente, quando estudados os explosivos e o seu tipo, podemos verificar que existem várias tipologias no comércio de explosivo, podendo estes serem em cartuchos, a granel ou em pó. Como é fácil de perceber, devido às diferentes características de cada um dos tipos de explosivos e a toda a técnica do seu manuseio, as velocidades de carregamento de um furo com explosivo será dependente do tipo explosivo aplicado. É do conhecimento no mundo da exploração mineira que, principalmente entre os dois tipos mais utilizados de explosivos, existe uma velocidade de carregamento, sendo a velocidade de carregamento de explosivo a granel ser significativamente superior a velocidade de carregamento dos explosivos encartuchados. A aplicação deste conhecimento, poderá oferecer uma boa diferenciação na operação de carregamento e do seu respectivo tempo de operação, contudo, um furo, de uma determinada pega de fogo, salvo raras excepções, é carregado totalmente e unicamente com um tipo de explosivo. Tirando as situações em que o furo é carregado unicamente com cartuchos, realizando-se o seu carregamento cartucho a cartucho, um furo é constituído por diferentes tipos de explosivos ou até mesmo aparelhos auxiliar, co o objectivo de realizar um desmonte mais seguro e eficiente. Com isto, ao contrário de ser aplicada uma diferenciação, na operação de carregamento, do tipo de explosivo, é preferível realizar a diferenciação por métodos de carregamento, com o objectivo de podermos representar, teoricamente, o que acontece na realidade, numa operação de carregamento.

De uma grande variedade de metodologias de carregamento, que varia de projecto para projecto, e até mesmo dentro de um mesmo projecto, em todo o mundo, foram escolhidas as principais metodologias, referidas de seguida:

- **Cartucho-a-cartucho**

Este tipo de carregamento é realizado unicamente com explosivos encartuchados, sendo que a sequência de movimentos, que se repete sucessivamente até a realização deste carregamento é: colocação do cartucho no furo – “empurramento” do cartucho com uma vara – retirada da vara. No final dá-se o ser devido tamponamento.

- **Explosivo a granel com explosivo encartuchado**

Nesta metodologia são aplicados os dois tipos de explosivo, sendo que o explosivo a cartucho servirá como carga de fundo e o explosivo a granel será a carga de coluna. Nesta metodologia inicialmente, como é lógico, deverá se realizar o carregamento da carga de fundo, desta forma deverão ser colocados cartuchos no furo e realizada a sua compactação, com apoio de uma vara, no fundo do furo, sendo estes movimentos repetidos em função da quantidade de cartuchos que constitui a carga de fundo. Após terminada a carga desta secção do furo é realizada a injeção do explosivo granulado sobre pressão, através de uma mangueira, até o volume/massa desejado. De seguida é realizado o tamponamento do furo.

- **Explosivo a granel com booster**

Esta metodologia é muito semelhante a anterior, sendo que o booster, que será referido mais tarde, substitui o explosivo encartuchado na carga de fundo. Para se realizar este carregamento, o booster, devidamente conectado aos fios de ligação, deverá ser colocado no furo e atacado no seu fundo, com o apoio de uma vara, sendo que após será realizada a injeção do explosivo a granel, tal como na metodologia anterior. Sendo o furo terminado com o seu correcto tamponamento.

- **Canas pré-preparadas**

Esta metodologia de carregamento envolve um trabalho prévio de preparação, reflectindo-se significativamente na velocidade de carregamento. A referida preparação, tem como principal objectivo a montagem numa cana de plástico a carga de explosivo que cada furo irá receber isto é, em cada cana serão colocados todos os componentes que seriam colocados na frente do túnel, dentro de cada furo, podendo eles ser o explosivo, o booster e os fios de ligação. Estas canas, com um diâmetro ligeiramente inferior ao do furo, são preparadas conforme as especificações da pega de fogo e do tipo de furo em causa, sendo agrupas e marcada, usualmente com cores, por tipos de furos. Com as canas de explosivos previamente preparadas, a operação de carregamento, propriamente dita, apenas será constituída pela colocação das canas nos respectivos furos e o tamponamento, tornando a operação, com esta metodologia, significativamente mais rápida.

Como podemos observar, para além dos dois principais tipos de explosivos que poderão carregar uma pega de fogo, existem diferentes metodologias de carregamento, que podem levar a tempos de duração desta operação relativamente distintos. Ao nível das velocidades de carregamento a metodologia mais rápida, é a de canas pré-preparadas, graças os trabalhos prévios. A metodologia de cartucho-a-cartucho é a de velocidade menor, sendo que as metodologias de explosivos a granel mais a cartuchos e de explosivo a granel mais booster se situam entre estas duas metodologias, sendo a metodologia com o booster ligeiramente mais rápida, quando comparadas. É importante voltar a salientar, que na operação de carregamento as actividades de limpeza do furo e de tamponamento estão sempre presentes, independentemente da metodologia seleccionada.

Independentemente da metodologia escolhida, a Equação 16 poderá ser utilizada para determinar o tempo despendido no carregamento efectivo da pega de fogo.

$$TC_{efec} = \frac{NF \times \frac{v_{carreg}}{c^{Pega}}}{NO_{carreg}} = \frac{NF \times c^{Pega}}{NO_{carreg} \times v_{carreg}} \quad (\text{Eq. 16})$$

TC_{efec} = Tempo despendido na actividade de carregamento efectivo, dentro da operação de carregamento, em minutos

v_{carreg} = Velocidade de carregamento, em função da metodologia, em metros de furo por minuto

Observadas e criadas expressões representativas das actividades de limpeza do furo e a de carregamento, efectivo, dos furos de uma pega de fogo, torna-se essencial a criação de uma expressão que represente a actividade de tamponamento. Apesar de, tal como a limpeza de furo, a duração desta actividade ser muito reduzida comparativamente com o carregamento efectivo da pega de fogo, a sua contabilização não poderá ser descartada, pois o tempo despendido no tamponamento de um único furo poderá ser reduzido, mas terá um grande peso quando contabilizado todo o tempo despendido no tamponamento dos furos de todo um projecto de escavação de um túnel. Uma abordagem, tal como realizada para as actividades anteriores, em que é baseado o cálculo do tempo da actividade na velocidade de limpeza ou carregamento por metro de furo, torna-se desinteressante para o tamponamento, pois esta actividade é realizada numa porção de comprimento muito reduzida comparativamente com as anteriores, ocupando uma pequena parte do comprimento total do furo. Com isto, a contabilização média do tempo despendido no tamponamento de um furo poderá ser a abordagem a ser tomada, pois o comprimento do tampão não é tão significativo como o comprimento total do furo. Pelo exposto, foi criada a Equação 17, representativa do tempo da actividade de tamponamento, dentro da operação de carregamento, para um ciclo de trabalho:

$$TC_{tamp} = \frac{NF \times t_{tamp}}{NO_{carreg}} \quad (\text{Eq. 17})$$

TC_{tamp} = Tempo despendido no tamponamento de todos os furos da pega de fogo

t_{tamp} = Tempo necessário para realizar o tamponamento de um único furo

Conhecidas as três actividades em que se é plausível dividir a operação de carregamento de uma pega de fogo e a suas expressões matemáticas, uma análise das variáveis da expressão torna-se importante:

- Números de furos: O número de furos a ser carregados é o principal influenciador do Tempo de Carregamento, existindo uma relação inversamente proporcional entre estes. Quanto maior for o número de furos a ser carregado, maior tempo terá de ser empregue nesta operações.
- Número de operadores: Na operação de carregamento, devido a ser uma operação manual, vê todas as suas actividades a serem apenas realizadas por operários. Desta forma a duração de cada uma das actividades e de na globalidade da sua operação

dependerá indirectamente do número destes. Se pensarmos que um único operador demorará um determinado tempo a carregar toda uma pega de fogo, é fácil compreender que se ao em vez de um operador, forem dois a realizar a operação, o tempo de carregamento será metade do tempo.

- Comprimento da pega: O comprimento da pega de fogo, correspondente ao comprimento do furo, é essencial para a determinação do tempo da operação, devido a ser um factor importantíssimo para a determinação dos tempos da actividade de limpeza e de carregamento. Os tempos de ambas as actividades é directamente proporcional ao comprimento da pega.
- Velocidade de limpeza: A velocidade de limpeza de um furo é importante para o tempo de duração da actividade correspondente. A velocidade está em função do comprimento do furo e é inversamente proporcional ao tempo da actividade de limpeza.
- Velocidade de carregamento: A velocidade de carregamento, em função do comprimento da pega (furo), é dependente da metodologia de carregamento adoptada, sendo óbvia a relação inversamente proporcional entre a velocidade de carregamento, já que quanto maior for a velocidade de carregamento, teoricamente menor será o tempo da actividade.
- Tempo de tamponamento: O tempo de tamponamento é fundamental para a determinação do tempo da actividade de tamponamento, sendo o tempo da actividade directamente proporcional a este parâmetro.

Por fim, no poder das três expressões, representativas de cada uma das actividade da operação, e do conhecimento de cada uma das variáveis, é nos possível obter a Equação 18, que permite determinar o tempo da Operação de carregamento (TC), para um ciclo de trabalho, de um determinado projecto.

$$TC = TC_{limp} + TC_{efec} + TC_{tamp}$$

$$TC = \frac{NF}{NO_{carreg}} \times \left(\frac{C^{Pega}}{V_{limp}} + \frac{C^{Pega}}{V_{carreg}} + t_{tamp} \right) \quad (\text{Eq. 18})$$

6.6 OPERAÇÃO DE LIGAÇÃO DA PEGA DE FOGO

Esta operação acontece posteriormente à operação de carregamento de explosivos, podendo ser considerada uma actividade de preparação de explosivos para a sua detonação. Como a denominação da operação refere, nesta ocorre a ligação da pega de fogo, isto é, a ligação entre todos os furos carregado, para que possa ocorrer a iniciação dos detonadores e a consequente detonação da pega de fogo. Esta operação é apenas passível de ser realizada manualmente, pelos operadores, e exige um grande conhecimento técnico por parte deste. Na Figura 45 podemos observar os trabalhos de ligação, na frente de um túnel, por parte de alguns operadores. Na duração desta operação, vários factores são importante, contudo o factor mais significativo nesta operação é a metodologia de ligação, que está directamente relacionada com os detonadores a serem utilizados.



Figura 45 – Trabalhos de ligação dos explosivos, na frente de desmonte de um túnel
(<http://www.expressrailink.hk/en/construction/progress-update.html>)

Como observado previamente, quando estudado o diagrama de fogo e as possibilidades de detonadores a serem empregues, existe vários tipos de detonadores que podem ser utilizados nos desmonte subterrâneo, sendo os detonadores eléctricos, não-eléctricos e electrónicos os mais utilizados. Contudo como também referido, os detonadores electrónicos não serão tomados em conta para este trabalho, devido ainda sua reduzida utilização Mundial comparativamente com os outros dois tipos detonadores. Desta forma, neste trabalho, e para o software, apenas serão admitidas duas metodologias de ligação: ligação com detonadores eléctricos ou com detonadores não-eléctricos.

A ligação de detonadores eléctricos, poderá ser realizada em dois circuitos diferentes. As ligações poderão ser realizadas num circuito em série, como exemplificado na Figura 46, aconselhável para pegas com um número reduzido de furos, enquanto uma ligação em circuito paralelo, como observado na Figura 47, poderá ser utilizada para todas as pegas, sendo aconselhável para aquelas em que estas envolvidos u grande número de furos e denotadores. Ambas as metodologias exigem um conhecimento alargado sobre a construção de circuitos eléctricos e o cálculo de resistência eléctricas de cada circuito, pois a eficiência da detonação depende de um circuito de detonação de qualidade. Quando as ligações estão completas, é prática comum, serem realizados testes do circuito, para observar se as ligações estão correctamente realizadas. Estes testes tentam descobrir se o circuito eléctrico, paralelo ou em série, está “fechado”, e podem ser utilizados instrumentos como o Ohmímetro ou o *Circuit Tester*. Como podemos perceber a ligação de detonadores eléctricos apresenta uma complexidade relevante, devido a se estar a trabalhar com correntes e circuitos eléctricos. Essa complexidade está presente no tempo de ligação de uma pega de fogo, que é bastante superior, em média, à ligação de detonadores não-eléctricos.

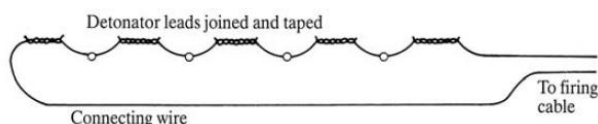


Figura 46 – Esquema de uma ligação, de detonadores eléctricos, em série (Rock Excavation Handbook Tamrock, 1999)

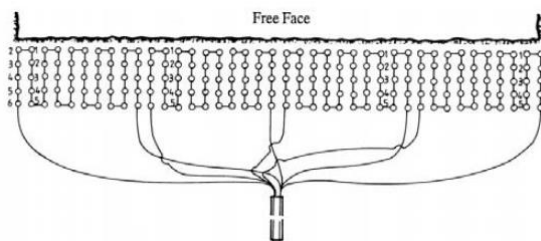


Figura 47 – Esquema de um circuito, de detonadores eléctricos, em paralelo (Rock Excavation Handbook Tamrock, 1999)

A ligação de detonadores não-eléctricos, apresenta-se como sendo mais simples, quando comparada com a ligação de detonadores eléctricos. Para detonadores não-eléctricos podem ser realizadas três tipos de ligações, direccionados para diferentes tipos de desmonte. Entre as três metodologias, uma direccionada para o desmonte a céu aberto, outra para desmonte em bancadas, à superfície ou subaquáticas e outra para desmonte subterrâneo, a grande diferença passa muito pelos atrasos utilizados entre cada grupo de furos, traduzido por diferentes intervalos de retardos. Porém na metodologia de ligação ambas técnicas são bastantes semelhantes, a ligação dos fios, conectados aos detonadores, que saem de cada furo são

conectados com conectores ou retardos, normalmente de plástico, ao fio detonante que passa por toda a frente de desmonte, sendo depois este conectado ao fio que será ligado ao equipamento de iniciação. Como podemos perceber, e observando a Figura 48, a ligação de detonadores não-eléctricos não é tão complexa como os detonadores eléctricos, sendo por isso a sua velocidade de ligação superior.

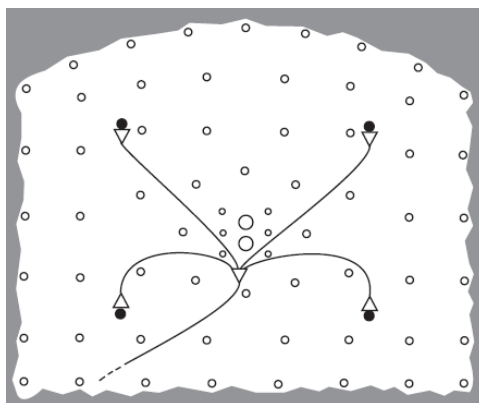


Figura 48 – Esquema de uma frente de desmonte de um túnel, com a ligação de detonadores não-eléctricos (Rock Excavation Handbook Tamrock, 1999)

Pelo referido a duração da Operação de ligação será influenciado pelos seguintes factores:

- Número de furos: Sendo a operação ligada à ligação dos furos d a pega de fogo, é importante relacionar a velocidade da operação com o número de furos da pega de fogo, pois se a pega for de 30 furos, só terão de ser realizadas 30 ligações, enquanto que se a pega tiver 60 furos, terão de ser feitas o dobro da ligações, que exigem ao dobro do tempo. Desta forma o número de furos influenciará directamente o tempo da operação.
- Número de Operadores: Sendo esta operação realizada pelo operadores, podendo ser auxiliados por equipamentos ou instrumentos, é fundamental a relacionar o número de operadores afectos à operação com a sua duração, sendo essa relação inversamente proporcional, tal como acontece em outras operações realizadas por operadores.
- Velocidade de ligação: Como referido, a velocidade de ligação será influenciada pela metodologia, isto é, pelos detonadores utilizados. Entre os detonadores possíveis, a velocidade de ligação com detonadores não-eléctricos é aproximadamente quatro vezes superior. A velocidade será apresentada em função do número de furos ligados por minuto. Na Tabela 23, podemos observar valores comuns, da velocidade de ligação de furos, em função dos detonadores utilizados

Tabela 23 – Relação entre o tipo de detonadores a ser utilizados e a velocidade da operação de ligação

Detonador	Número de furos ligado por minuto (v_{lig})
Não-eléctrico	2
Eléctrico	0,5

Em concordância com os factores influenciadores no tempo da operação, podemos determinar o tempo despendido na Operação de Ligação empregando a Equação 19.

$$TL = \frac{(NF/v_{lig})}{NO_{lig}} \quad (\text{Eq. 19})$$

TL = Tempo total da operação de ligação, num ciclo de trabalho, em minutos

NF = Número de furos da pega de fogo

v_{lig} = Número de furos ligados em um minuto

NO_{lig} = Número de operadores afectos a operação ode ligação da pega de fogo

6.7 OPERAÇÃO DE SAÍDA DOS OPERADORES E DISPARO DA PEGA DE FOGO

Após terminada a operação de ligação, do explosivo da pega de fogo, para que seja realizada a sua detonação, são realizadas as seguintes operações:

6.7.1 Saída dos Operadores

Após terminada a Operação de Carregamento e de Ligação da pega de fogo, os operadores responsáveis por estas, tem de se retirar do túnel, colocando-se em posições de segurança. Tal como os operadores, os equipamentos deverão ser posicionados a uma distância de segurança, de forma a não serem danificados, durante a detonação da pega de fogo.

Para além dos requisitos e normas de segurança, principalmente quanto à distância considerada de segurança, que muitas das vezes obriga a saída efectiva do túnel, outros factores são importantes de serem considerados. O tempo necessário para a saída dos operadores é fortemente dependente do nível de avanço de construção do túnel, isto é, da distância total já escavada no maciço. Quanto maior for o avanço da construção do túnel, maior será a distância entre a frente de desmonte, onde os operadores vão realizar a operação de carregamento, e a boca do túnel, local que, regra geral, é considerado como local de segurança. Como essa distância vai aumentando à medida que a construção avança, o tempo necessário para a saída dos operadores do túnel será maior, dependendo então o tempo desta actividade do comprimento de túnel aberto.

Quanto à velocidade de saída dos operadores, importante para o cálculo do tempo desta actividade, é possível realizar uma divisão em duas partes. Inicialmente, quando o túnel ainda apresenta uma curta extensão os operadores podem realizar a actividade a pé, enquanto a partir de um certo comprimento do túnel torna-se inviável que os operadores se desloquem a pé, tendo esse trajecto de ser realizado em algum equipamento motorizado, como um jeep. Como é lógico, a velocidade de locomoção a pé será significativamente menor, quando comparada com a velocidade de um meio de transporte motorizado. Desta forma para o cálculo do tempo despendido na saída poderia se realizar a divisão para as duas velocidades, contudo para o transporte dos explosivos, sejam eles encartuchados ou em emulsão, dos detonadores e outros instrumentos auxiliares necessários para a detonação da pega de fogo, são utilizados equipamentos de transporte, pois poderá se tratar do transporte de grandes volumes e cargas. Logo admitindo-se que quando se der a saída dos operadores também terá de ocorrer a saída desses meios de transporte, não é descabido admitir que a velocidade de saída dos operadores será correspondente à velocidade de saída realizada por um veículo motorizado, independentemente das distâncias percorridas.

Pelo referido poderíamos então estudar o tempo de duração desta actividade, segundo as velocidades de deslocação e as distancia a percorrer, para cada ciclo de trabalho, obtendo-se a Equação 20.

$$TD_{Saída} = Distância_{Boca\ Túnel-Frente\ Desmonte} \times Velocidade\ de\ Saída \quad (Eq. 20)$$

Uma abordagem matemática, como a anterior, levaria a que o tempo de saída do pessoal tivesse um comportamento crescente ao longo da evolução do projecto, acrescentando assim a sua complexidade de estudo.

Para contrariar a complexidade acrescida da metodologia anterior, foi decido, baseado em diálogos com especialista no assunto, que poderia ser admitido uma duração da actividade constante, para todo o projecto, baseado em experiencias e valores razoáveis. A escolha desta metodologia, para esta dissertação, é baseada nos pressupostos que a saída do pessoal apenas é realizada uma única vez durante todo o ciclo de trabalho e que para distâncias muito curtas a saída possa ser feita a pé e que para distancia mais longas a saída seja realizada por meios motorizados, o que leva a que a o tempo da actividade presente uma pequena variância ao longo de todo o projecto. A partir deste pressuposto, o estudo mais pormenorizado desta actividade, ao nível dos seus factores influenciadores, poderá ser um grande complemento, de futuros trabalhos, para esta dissertação.

6.7.1 Detonação da Pega de Fogo

Findada toda a preparação e ligação da pega de fogo, e estando todo o túnel livre, sem operadores e equipamentos, é realizada a detonação da pega de fogo, com o objectivo de desmontar a frente do túnel. Está operação é relativamente rápida, sendo que a sua duração de alguns minutos se deve a motivos de segurança, pois são emitidos em toda a área de construção vários sinais sonoros, com o objectivo de identificar o momento de detonação da pega de fogo. O tempo de demora desta actividade é admitido como constante para todas as pegas de fogo, pois a influência do número de furos da pega de fogo ou até mesmo do tipo de detonadores utilizado pode ser considerada insignificante. Sendo assim podemos relacionar o tempo de duração da actividade de Detonação com o tempo de segurança.

$$TD_{Detonação} = Tempo\ de\ Segurança \quad (Eq. 21)$$

Em suma, analisando as duas actividades, com o propósito de estimar o tempo de duração de um ciclo de trabalho e consequentemente o tempo de duração de um projecto, podemos admitir uma duração constante para toda a operação de Saída dos operadores e Detonação, podendo ser a atribuição deste valor de duração baseado em experiencias anteriores, de outros projecto. Como será observado, quando estudado o utilitário informático, para esta dissertação, foi admitido uma duração de 20 minutos, para esta operação, como um valor bastante fiável e representativo.

6.8 OPERAÇÃO DE VENTILAÇÃO

Após realizada a detonação da pega de fogo, é necessário um período de tempo para realizar a ventilação da área próxima da frente do túnel desmontado. Como observado anteriormente, quando falado sobre os explosivos, estes durante a sua detonação libertam grandes volumes de gases, podendo partes destes possuir características tóxicas, nefastas para o Homem. Um ambiente fechado, como um túnel, com grandes volumes de gases, possivelmente tóxicos, seria extremamente perigoso para todos os operadores que se movimentassem nesse local, por tal perigo para os operadores, principalmente aqueles que irão realizar o saneamento da secção do túnel desmontado, é essencial uma ventilação eficaz. Considera-se uma ventilação eficaz, aquela em que, num determinado período de tempo, se consegue repor as condições atmosféricas naturais e não-perigosas para o Homem, isto é, nesse período de tempo deverá ocorrer a expulsão dos gases, originados pela detonação da pega de fogo, e a reposição dos níveis de oxigénio para valores aceitáveis. Para além do objectivo referido, a ventilação poderá ter o objectivo de:

- Fornecer oxigénio para o interior do túnel
- Remover gases libertados pelos equipamentos que se movimentam dentro do túnel.
- Remover poeiras originados pela perfuração do maciço e pelo movimento dos equipamentos e operadores
- Mantêm a temperatura do túnel estável, em valores confortáveis para os operadores

Num projecto de escavação de túnel, como referido vários gases tóxicos e nocivos são criados, pela detonação dos explosivos ou pelos equipamentos. Principalmente, na frente de desmonte, onde os operadores passaram mais tempo, deverá ocorrer um controlo ao minuto dos seguintes gases: óxido de nitrogénio, monóxido de carbono, dióxido de carbono, amoníaco e de oxigénio, bem como, mesmo não sendo um gás, da concentração de poeiras suspensas no ar.

Como referido a ventilação ocorre durante um período de tempo, que poderá variar de situação para situação, sendo principalmente influenciado por:

- Volume de gases formado: Conhecendo-se o diagrama de fogo e os explosivos que serão utilizados facilmente se determina o volume total de gases que será formado pela detonação de toda a pega de fogo.
- Tipo de gases formado: Realizar a ventilação de gases tóxicos poderá obrigar a um período mais longo de tempo, servindo como uma medida de segurança muito importante para os operadores.
- Tipo de ventilação: A ventilação poderá ser realizada de forma insuflante, aspirante ou ambos.
- Potência dos equipamentos de ventilação: Dependendo da potência dos equipamentos de ventilação, diferentes volumes de ar poderão ser movidos, quanto

maior for a sua potência, maior será a capacidade e como esperado, menor será o tempo necessário de ventilação.

- Distância da frente desmontada à boca do túnel: Quando mais próximo à frente de desmonte estiver da boca do túnel, mais rápida e eficaz será a ventilação. Se a frente de desmonte estiver a poucas dezenas de metros da boca do túnel a ventilação é realizada quase de forma natural e rápida, sem exigir o apoio de equipamentos. Contudo quanto maior for a distância entre estas duas zonas maior será a dificuldade de ventilação, obrigando ao movimento de grandes volumes de ar ao longo de longo de grandes distâncias, exigindo assim um período de ventilação superior.

A ventilação natural, sem o apoio de equipamentos dificilmente é realizada em túneis, onde a sua escavação é realizada pelo método de Perfuração e Detonação, pois desta forma o tempo da operação seria extremamente longo, principalmente à medida que o túnel fosse aumentado o seu comprimento, isto é, à medida que a zona a ser ventilada fosse se afastando da boca do túnel. Não sendo possível uma ventilação natural, é então necessário a utilização de equipamentos que acelerem a operação, mantendo uma grande eficiência. Os principais equipamentos encontrados num sistema de ventilação subterrâneo são:

- **Ventilador**
Este equipamento tem como objectivo movimentar o ar/gases, através de si, graças ao movimento de pás giratórias. Estes equipamentos, de forma geral, permite o movimento nos dois sentidos, possibilitando o seu uso nas técnicas de ventilação inflante e aspirante. Estes equipamentos são comercializados em diferentes dimensões e com várias potências, sendo a suas capacidades de movimentação dependentes dessas características. De uma forma geral, ao ventilador principal, responsável pelo movimento do fluxo de ar/gás designa-se por ventilador primário, estando colocado numa das extremidades das mangas de ventilação. Para além deste, e ao longo das mangas poderão existir mais ventiladores, neste caso secundários, de forma a apoiar na ventilação.
- **Mangas de ventilação**
Estas estruturas, normalmente fabricadas com plásticos resistentes, estão conectadas aos ventiladores, e tem como objectivo receber o ar ou gás, movimentado pelo ventilador, encaminhando-o, sem o dispersar, para o seu destino. As mangas de ventilação são comercializadas em diferentes diâmetros e comprimentos, devendo-se adequar as exigências. Na Figura 49, pode-se observar o exemplo de uma manga de ventilação, dentro de um túnel.



Figura 49 – Mangas de ventilação para trabalhos subterrâneos
(<http://soveper.lida.pt/ventilacaominast.html>)

Apesar de os equipamentos de um sistema de ventilação de um túnel, não variarem muito de projecto para projecto, a sua organização pode ser alterada, originando sistemas com características diferentes e com valências próprias, ideias para diferentes tipos de projectos. Desta forma, os principais sistemas de ventilação aplicáveis são:

❖ Ventilação Insuflante

Nesta técnica de ventilação, é realizada a introdução de ar fresco, proveniente do exterior do túnel, para a frente de desmonte de forma mecânica. Com a introdução do novo ar, os gases presentes no local serão “empurrados para o exterior, ao longo do túnel. Nesta técnica o ventilador primário situasse na boca do túnel, injectando ar fresco na manga do túnel. Esta configuração apresenta-se como a mais utilizada, principalmente na escavação de túneis, comparativamente com os outros sistemas de ventilação. Pois com a ventilação insuflante, a medida que o túnel avança, só existe a necessidade de acrescentar mais manga de ventilação a extremidade existente. Na Figura 50 podemos observar o esquema da frente de desmonte de um túnel, onde se realiza a ventilação insuflante.

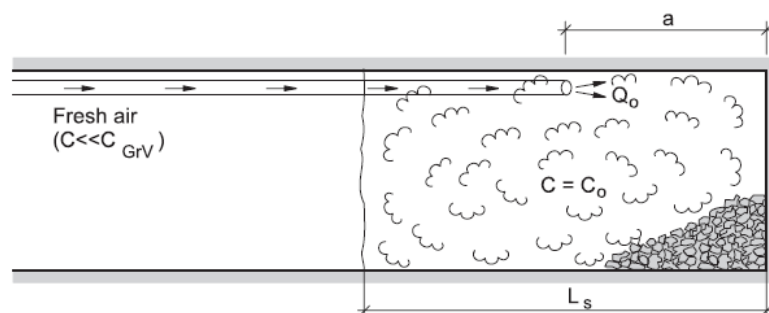


Figura 50 – Esquematização da ventilação insuflante de um túnel (Rock Excavation Handbook Tamrock, 1999)

❖ Ventilação aspirante

Contrariamente à ventilação insuflante, os gases da frente de desmonte são removidos de forma mecânica. A aspiração dos gases para o exterior, através da manga de ventilação, leva a que o ar fresco entre naturalmente pelo túnel. Neste caso o ventilador primário estará localizado dentro do túnel próximo á frente de desmonte, aspirando os gases e poeiras para a manga de ventilação. Através da Figura 51 podemos observar os princípios básicos da aspiração aspirante, na frente de desmonte de um túnel.

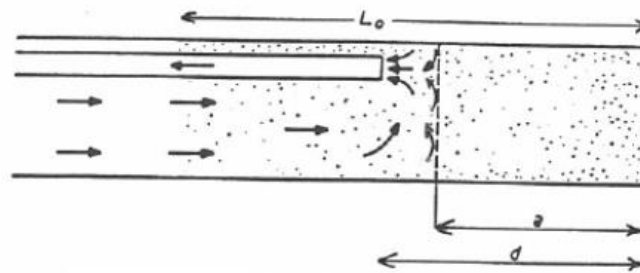


Figura 51 – Esquematisação da ventilação aspirante de um túnel (López Jimeno, 2003)

❖ Ventilação simultânea

Neste caso, são combinadas as técnicas de ventilação insuflante e aspirante, colocando-se dois conjuntos de equipamentos de ventilação, responsáveis por cada uma das técnicas. Esta ventilação é muito mais rápida e eficiente do que as anteriores, sendo aconselhável quando o ambiente gasoso é extremamente nocivo e/ou o túnel apresenta um comprimento demasiado grande, que dificulta a entrada ou saída de ar/gases de forma natural. Observando a Figura 52 podemos compreender os trabalhos de ventilação simultânea, que ocorrem na frente de desmonte de um túnel.

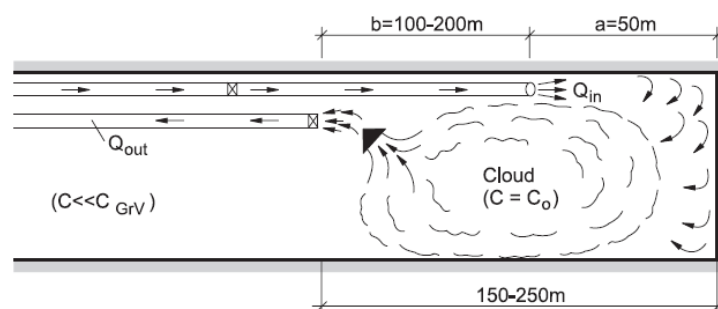


Figura 52 – Esquematisação da ventilação simultânea de um túnel (Rock Excavation Handbook Tamrock, 1999)

É prática comum, para aumentar os níveis de rentabilidade do tempo de trabalho no projecto, a utilização do tempo referente à operação de ventilação para outras actividades que sejam realizadas pelos funcionários fora do túnel em escavação. Geralmente é obrigatória a realização de uma pausa, por parte dos funcionários, de aproximadamente uma hora, para que estes possam realizar as suas refeições. Como neste período os funcionários, normalmente, estarão no exterior do túnel em construção, sem realizarem qualquer operação do ciclo de construção do túnel, é apropriado utilizar a hora da refeição para a operação do ciclo que obriga a inexistência de funcionários dentro do túnel, como é o caso da ventilação. Com a realização simultânea da ventilação do túnel e o período de refeição dos funcionários, a rentabilidade das horas de trabalho aumenta. Outro momento que poderá ser utilizado para a ventilação do túnel, é o momento de troca de turnos de trabalho, por parte dos operadores.

Com esta prática de trabalho, a ventilação ocorrer num período com uma duração de uma hora, independentemente do comprimento do túnel, do tipo de ventilação e do tipo de gases libertados.

6.1 OPERAÇÃO DE SANEAMENTO

Após a ventilação do túnel ter sido realizada, oferecendo na área uma atmosfera não-perigosa para os funcionários, a próxima operação do ciclo de trabalho é o saneamento da área desmontada.

O saneamento é a operação, realizada na área desmontada, que visa observar se as paredes e tecto da nova secção do túnel se encontram estáveis, de forma a ser seguro estarem presentes operadores e equipamentos sob eles. A nova secção não será segura, quando partes do tecto e paredes estiverem instáveis, isto é, quando partes do maciço recém-desmontado, apresentarem grandes possibilidades de se separarem e caírem sobre funcionários e equipamentos. Do maciço, matérias com diferentes tamanhos podem se soltar, desde pequenas pedras até blocos com dimensões consideráveis, sendo que dependendo do seu tamanho, o risco pode aumentar, podendo a queda de blocos de consideráveis dimensões levar a morte de funcionários ou à destruição de equipamentos.

O nível de saneamento de uma secção de um túnel está fortemente interligado com a qualidade do maciço em causa e com a qualidade do diagrama de fogo e desmonte aplicados. Quando o maciço rochoso apresenta uma qualidade baixa, possuindo várias famílias de falhas, o saneamento terá de ser, de forma geral, muito mais cuidadoso e intenso, enquanto se o maciço possuir características geológicas muito boas, sem se verificarem falhas, o saneamento de forma geral não é tão perigoso.

A quando a construção do diagrama de fogo, a ser utilizado no desmonte, este deverá estar em concordância com as características geológicas do maciço, isto é, o diagrama de fogo deverá ser alterado dependendo das zonas do maciço, de forma a obtermos um desmonte mais eficiente e uma secção de desmonte mais segura. Contudo, mesmo um diagrama de fogo em concordância com as características do maciço não levará obrigatoriamente a um saneamento seguro e curto, pois o carregamento de explosivos também será um factor influenciador. Se o carregamento dos furos, principalmente de contorno, for realizado de forma deficiente é de se esperar paredes e tecto do túnel instáveis, logo perigos para os operadores, obrigando a um saneamento demorado.

A operação de saneamento em si, é realizada geralmente, manualmente pelos funcionários, podendo também ser realizada por equipamento especializados, que apesar de apresentarem um maior segurança, aumentam o custo do projecto. Quando é realizado de forma manual, os funcionários, utilizando varas metálicas batem e raspam as paredes e tecto da secção do túnel, procurando blocos que se movam ou zonas em que seja possível escutar sons ocos, estas duas situações significam, normalmente, instáveis, que terão de ser removidas pelos operadores, evitando assim que caiam, de forma imprevista, nos períodos em que haja movimento sob elas. Para o material rochoso instável ser removido, os operadores utilizam as varas de ferro, ou outras ferramentas, que apresentam nas suas extremidades cunhas de diferentes formatos, como observado na Figura 53, com o propósito de que a sua remoção ocorra da forma mais

controlada possível. Como é de imaginar, esta operação apresenta um alto nível de perigo para os funcionários, obrigando a que a sua realização seja realizada por funcionários experientes de forma eficiente e segura, pois tanto a segurança dos funcionários responsáveis pelo saneamento, como os funcionários e equipamentos que passaram na zona estão em causa. Para túneis de maiores dimensões, em que o saneamento manual seira muito demorado, ou para situações em que o túnel apresenta uma má qualidade, sendo muito perigoso para os funcionários se deslocarem sobre a nova secção escavada, muitas vezes são utilizados equipamentos mecanizados, como observado na Figura 54, que tornam a tarefa mais segura, eficiente e rápida.

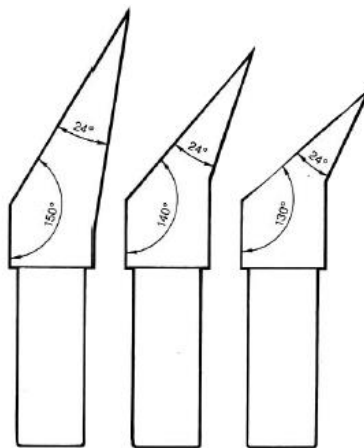


Figura 53 – Instrumentos manuais de saneamento (Rock Excavation Handbook Tamrock, 1999)



Figura 54 – Equipamentos de saneamento, Scaletec LC, da Atlas Copco (www.atlascopco.pt)

Quando observamos o ciclo de trabalho da construção de um túnel, a operação de saneamento poderá ser realizada durante diferentes períodos de tempo, sendo a abordagem para o seu cálculo diferente.

Uma das formas mais simples para a determinação do tempo a ser despendido na operação é baseando-se em outros projectos realizados, com características aproximadas, definir o tempo de saneamento. Porém esta metodologia não levará em conta vários factores, como o número de funcionários ou as características da pega de fogo.

No caso deste trabalho, após um raciocínio demorado, a determinação do período referente à operação de saneamento deverá passar por uma formulação matemática, que permita o cálculo do tempo, levando em conta duas variáveis: o avanço do desmonte e o número de funcionários afectos a esta operação. A escolha do avanço, originado pelo desmonte, torna-se importante, pois dependendo do comprimento da pega de fogo, logo do avanço, a secção de túnel a ser saneada varia, por outras palavras, se analisarmos dois túneis em que o comprimento da pega de fogo é diferente, é de se esperar que o saneamento necessite de um período de tempo maior para o túnel em que a construção aplica um comprimento de pega de fogo maior, pois neste caso uma maior área terá de ser saneada. Quando ao número de funcionários que efectuaram a operação, é seguido o raciocínio aplicado nas operações de marcação e de carregamento da pega de fogo. Se uma determinada operação necessitar de um determinado tempo a ser realizada por um único funcionário, quando esta mesma operação é realizada por dois funcionários, o tempo para completar a operação será metade do tempo original.

Conhecendo-se então, a partir do estudo de casos reais, o tempo que um funcionário demorará a realizar o saneamento de uma área correspondente ao avanço de um metro de túnel, traduzido pela expressão v_{san} , acompanhado do raciocínio anterior, em que o tempo para a operação de saneamento varia directamente com o avanço do desmonte e indirectamente com o número de funcionários, podemos construir a Equação 22.

$$TS = \frac{(AP/v_{san})}{NO_{san}} \quad (\text{Eq. 22})$$

TS = Tempo despendido na operação de saneamento, num ciclo de trabalho, em minutos

AP = Avanço previsto, provocado pelo desmonte de uma pega de fogo, em metros

v_{san} = Comprimento saneado por unidade de tempo, em metros por minuto

NO_{sanem} = Número de operadores afectos à operação de saneamento

A utilização de uma expressão, como a anterior, permitirá um cálculo automático do tempo de saneamento eficaz, numa visão lógica, contudo os valores apresentados na expressão não contabilizam um dos influenciadores principais, as características geológicas do maciço. De tal forma que os valores obtidos, através da expressão, deverão ser analisados consoante a geologia. Se o maciço apresentar fraca qualidade, com grande presença de falhas, é aconselhável o aumento do tempo de saneamento.

6.2 OPERAÇÃO DE REMOÇÃO DO ESCOMBRO

Após realizadas todas as operações que levam ao desmonte de um novo troço do túnel, bem como as operações que levarão à reposição dos níveis de segurança dentro túnel (ventilação e saneamento), segue-se a operação de remoção do material rochoso desmontado. Quando se realiza a detonação de uma pega de fogo, o material desmontado irá ocupar a área do túnel próxima à sua posição inicial, impossibilitando assim o acesso a nova frente livre do túnel, logo será impossível iniciar-se um novo ciclo de trabalho, iniciado novamente pela marcação da pega de fogo ou perfuração, dependendo das características do Jumbo de perfuração, na nova frente livre.

A operação de remoção é constituída por duas grandes actividades interligadas, sendo elas denominas por carga e transporte. A eficiência da operação de remoção é fortemente dependente da relação destas duas actividades e da sua correcta realização no tempo.

A operação de remoção do escombros da frente, dividida na carga e transporte do material rochoso desmontado, é uma das operações mais estudadas, dentro de um ciclo de trabalho, pela ciência, sendo o conjunto destas duas actividades referida como sistema de carga e transporte. Devido a importância destas operações em projectos relacionados com a Engenharia de Minas e Engenharia Civil, vários autores têm-se focado na quantificação temporal destas actividades, de forma a diminuir os tempos de operação, sem prejudicar a produtividade das operações. Para um sistema de carga e transporte, vários estudos podem ser realizados para os seus equipamentos, sendo os próximos tempos os mais apoiados pelos autores:

❖ Tempo de Ciclo Mínimo Elementar

Menor tempo de ciclo necessário, por parte de um equipamento, para realizar a sua tarefa. Apenas são contabilizados os tempos elementares sejam eles fixos (tf) ou variáveis (tv).

$$TC_{min} = \sum tf + \sum tv \quad (\text{Eq. 23})$$

❖ Tempo de Ciclo Efectivo

Ao Tempo de Ciclo Mínimo Elementar, são adicionados os tempos de ciclo suplementares (ts), representativos de tempos perdidos devido a desorganização das operações e de tempos de inactividade (paragem), principalmente caracterizados por tempos em filas de espera.

$$TC_{efec} = \sum tf + \sum tv + \sum ts \quad (\text{Eq. 24})$$

❖ Tempo Disponível

Contabilização do tempo em que o equipamento se encontra livre para realizar a sua tarefa.

❖ Produção de um equipamento

Tanto para os equipamentos de carga e de transporte, a produção (Q) representa o volume de material deslocado por estes, nos seus baldes ou caixas. A determinação da produção de uma unidade de carga ou de transporte levará em consideração o volume de material transportado por este (C), durante uma unidade de tempo, para tal será necessário conhecer o tempo de ciclo elementar da unidade (TC).

$$Q = C \times \frac{1}{TC} \quad (\text{Eq. 25})$$

- Produção máxima ou teórica

$$Q_{max} = C_{max} \times \frac{1}{TC_{min}} \quad (\text{Eq. 26})$$

- Produção Efectiva ou Real

$$Q_{efec} = C_{max} \times \frac{1}{TC_{efec}} \quad (\text{Eq. 27})$$

❖ Rendimento da Operação

O rendimento da operação (R), é um indicador da eficiência de uma determinada operação, variando o seu valor entre 0 e 1. O rendimento é aplicado em várias ciências, sendo também observável em várias operações constituintes do ciclo ode trabalho de escavação de um túnel. Para o sistema de cargas e transporte, o rendimento será a relação entre o tempo efectivamente despendido pelo equipamento para realizar a sua tarefa (TC_{efec}) e o tempo máximo disponível (TC_{min}).

$$R = \frac{Q_{efec}}{Q_{max}} = \frac{TC_{min}}{TC_{efec}} \quad (\text{Eq. 28})$$

Como referido por vários autores, o rendimento de uma operação, seja de carga ou transporte, está intrinsecamente relacionada com os tempos suplementares, representativos das paragens e perdas de tempo, desta forma Miranda, H. S. (1968), apresenta a seguinte expressão de cálculo do rendimento, concedendo ênfase aos tempos suplementares:

$$R = \frac{TC_{min}}{TC_{min} + \sum ts} = \frac{1}{1 + \frac{\sum ts}{TC_{min}}} \quad (\text{Eq. 29})$$

De seguida as duas operações constituintes da Operação de Limpeza da Frente serão debatidas, de forma a serem descortinadas as suas diferenças e, principalmente, as suas importâncias, a nível temporal, para um ciclo de trabalho. Correlacionado com as expressões anteriores, serão apresentados variados tempos de operações, sendo focados principalmente os tempos efectivos, relacionados com a produção efectiva (máxima) dos equipamentos.

6.2.1 Actividade Carga

A actividade de carga do escombros, não só para um ciclo de trabalho referente à escavação de túnel, mas para muitos dos ciclos de trabalho encontrados em projectos mineiros, é definido como a operação responsável pelo movimento do material rochoso desmontado, entre a frente de desmonte e o equipamento de transporte. Esta actividade é realizada por equipamentos especializados para a operação, como é exemplo a pá carregadora. Um equipamento de carga realiza determinados movimentos, que no seu agregado são definidos como o ciclo elementar do equipamento, para completar um processo de carga do material e posterior carregamento do equipamento de transporte.

6.2.1.1 Equipamentos de carga

Como referido, existem diferentes tipos de equipamentos de carga, que devido à sua estrutura oferecem diferentes soluções, para diferentes problemas. A LHD e as pás-carregadoras são as mais comuns, em projectos de escavação de túneis e serão de seguida apresentadas, contudo poderão ainda ser utilizadas escavadoras hidráulicas ou equipamentos de carga contínua.

❖ **Load Haul Dump:** Ao nível dos equipamentos de carga as LHD são sem dúvida as mais utilizadas em projectos de escavação de túneis, devido à sua rapidez, eficiência e versatilidade comparativamente com outros equipamentos. As vantagens que mais destacam estes equipamentos são:

- Eficiente distribuição do peso pelo equipamento
- Baldes de grandes capacidades
- Estabilidade numa grande variedade de superfícies
- Velocidades de deslocação altas, mesmo com o balde totalmente carregado



Figura 55 – Load Haul Dump: Scooptram ST1530 da Atlas Copco (www.atlascopco.pt)

- ❖ **Pá carregadora:** Estes equipamentos são bastante utilizados em actividades de carga, devido à sua grande mobilidade, versatilidade e económica, comparativamente com outros equipamentos, principalmente a LHD. Para além destas vantagens, estes equipamentos apresentam baldes de grandes dimensões, o que é bastante interessante para determinados projecto. Estes equipamentos são principalmente aconselháveis para distâncias de carregamento curtas, isto é, para distâncias entre o material desmontado e a unidade de transporte curtas. Apesar das suas grandes vantagens, estes equipamentos exigem terrenos de trabalho sólidos, bem como alguns problemas de travagem, comparando com escavadoras hidráulicas. Para esta dissertação, os equipamentos de carga utilizados serão apenas as pás carregadoras, pois apenas se possuem dados temporais, sobre os movimentos destes equipamentos.



Figura 56 – Pá-carregadora: 972H da CAT (www.cat.com)

Ao nível da escolha do equipamento a ser utilizado, diversos parâmetros deverão ser pensados, principalmente as suas dimensões. Evidentemente que o equipamento escolhido deverá apresentar dimensões inferiores à área de secção do túnel, para que possa se deslocar dentro do túnel. Tal como para as unidades de transporte, o utilitário informático não imporá nenhum valor para as dimensões do equipamento, traduzido de forma geral pelo volume do balde, sendo que deverá partir por parte do utilizador a precaução para quais quer problemas relacionados com esta escolha.

6.2.1.2 Ciclo Elementar de um Equipamento de Carga

Como referido, um equipamento de transporte, para realizar a tarefa para o qual foi concebido, realiza um determinado conjunto de movimento, designado como ciclo elementar. Para uma pá carregadora esse ciclo de carregamento é definido pela seguinte sequência de movimentos elementares:

1. Aproximação da pá carregadora ao material desmontado
2. Carregamento do balde, caracterizado por movimentos de pequenos recuos e avanços do equipamento, com o objectivo de realizar um enchimento total do balde. Os movimentos do equipamento podem ser acompanhados pelos próprios movimentos da caçamba.
3. Recuo da pá carregadora já carregada
4. Manobra, após o recuo, de forma a direccionar-se para o equipamento de transporte
5. Avanço até ao equipamento de transporte
6. Descarga do material existente no balde para a caixa do camião
7. Recuo da pá carregadora, com o objectivo de reaproximação à pilha
8. Reinício do ciclo elementar

Em cada ciclo de trabalho elementar será efectuada a remoção de um determinado volume de material rochoso da frente de desmonte para a caixa da unidade de transporte, sendo que o número de ciclos elementares necessários para realizar o total enchimento da caixa do equipamento de transporte, $NCER_{Trans}$, dependerá do volume da caixa e do volume do balde do equipamento de carga. O número de ciclos elementares poderá ser designado de uma forma mais simples, como o número de baldes do equipamento de transporte, necessários para encher a caixa de um equipamento de transporte, como pode ser observado na Equação 30.

$$NCER_{Trans} = \frac{\text{Volume Caixa Equip. Transporte}}{\text{Volume Balde Equip. Carga}} \quad (\text{Eq. 30})$$

De referir, que os ciclos elementares dos equipamentos de carga, para além das pás carregadoras, como as DHL, apresentam uma sequência de movimentos muito similares a da pá carregadora, sendo essencialmente os tempo de cada movimento que varia entre os equipamentos.

Calculado o número de baldes, da unidade de carga, necessários para encher a caixa da unidade de transporte, torna-se também relevante calcular o número total de baldes para retirar todo o material rochoso desmontado da nova frente livre do túnel, por outras palavras, determinar o número de ciclos elementares do equipamento de carga exigidos para remover todo esse material, traduzido como *NCER*, na Equação 31.

$$NCER = \frac{\text{Volume Total Desmontado}}{\text{Volume Balde Equip. Carga}} \quad (\text{Eq. 31})$$

Para o estudo do ciclo de trabalho do equipamento de carga, uma das metodologias poderia ser a temporização de todos os movimentos que compõem o ciclo elementar do equipamento, contudo a quantificação de um grande número de movimentos é um trabalho complicado, levando-se ainda em conta que o processo de divisão de movimentos, por vezes muito curtos e rápidos, é eficiente a nível lógico, sendo que no campo prático, muitas das vezes é impossível observar e realizar divisões claras entre movimentos, sendo difícilimo perceber-se onde termina um movimento e onde começa outro. Para se evitar estes problemas, foi se escolhida um abordagem mais simples e compacta, efectuando-se a separação do ciclo elementar de trabalho do equipamento de carga em apenas quatro movimentos, contrastando com os oito movimentos anteriores. Ou quatro movimentos então definidos são:

- **Movimento de Carga:** neste movimento estão contabilizados todas as manobras do equipamento, entre a sua chegada a frente do material rochoso desmontado e o total enchimento do balde do equipamento.
- **Movimento de Viagem Carregado:** conjunto de movimento que o equipamento realiza entre o instante em que o balde está totalmente cheio e o instante em que o equipamento se encontra junto ao equipamento de transporte.
- **Movimento de Descarga:** Movimento de descarga do balde para a caixa do equipamento de transporte.
- **Movimento de Viagem Vazio:** Grupo de movimentos que o equipamento de carga efectua-a, entre o instante que descarrega todo o seu material e o instante em que se encontra novamente em frente ao material desmontado, pronto a carregar o seu balde.

Com a divisão do ciclo elementar nos quatro movimentos anteriormente referidos, a metodologia de estudo torna-se mais simples, bem como a aquisição de dados em projecto reais. Ao nível matemático podemos definir o tempo do ciclo de elementar e um equipamento de carga, pela Equação 32.

$$TCER = TCER_C + TCER_{VC} + TCER_D + TCER_{VV} \quad (\text{Eq. 32})$$

$TCER$ = Tempo despendido para completar um ciclo elementar de Carga, em minutos

$TCER_C$ = Tempo, do Ciclo elementar de carga, despendido no movimento de Carga

$TCER_{VC}$ = Tempo, do Ciclo elementar de Carga, despendido no movimento de Viagem Carregado

$TCER_D$ = Tempo, do Ciclo elementar de Carga, despendido na Descarga

$TCER_{VV}$ = Tempo, do Ciclo elementar de Carga, despendido no movimento de Viagem Vazio

De referir, que para o ciclo elementar de carga, tal como acontecerá para o ciclo elementar de transporte, não são assumidos tempos “mortos”, devido a esperas por outros equipamentos, esperas em filas ou a cruzamentos entre equipamentos. Apesar de estes tempos não serem assumidos na determinação temporal das actividades, não serão esquecidos para o projecto. Pois como veremos, para a duração do projecto entraremos com o rendimento das operações, equipamentos e operadores. Sendo que neste rendimento estarão contabilizadas estas possíveis perdas de tempo.

Para o estudo do ciclo de trabalho do equipamento de carga, uma das metodologias poderia ser a temporização de todos os movimentos que compõem o ciclo elementar do equipamento, contudo a quantificação de um grande número de movimentos é um trabalho complicado, levando-se ainda em conta que o processo de divisão de movimentos, por vezes muito curtos e rápidos, é eficiente a nível logico, sendo que no campo pratico, muitas das vezes é impossível observar e realizar divisões claras entre movimentos, sendo difícilimo perceber-se onde termina um movimento e onde começa outro. Para se evitar estes problemas, foi se escolhida um abordagem mais simples e compacta, efectuando-se a separação do ciclo elementar de trabalho do equipamento de carga em apenas quatro movimentos, contrastando com os oito movimentos anteriores. Ou quatro movimentos então definidos são:

- **Movimento de Carga:** neste movimento estão contabilizados todas as manobras do equipamento, entre a sua chegada a frente do material rochoso desmontado e o total enchimento do balde do equipamento.

- **Movimento de Viagem Carregado:** conjunto de movimento que o equipamento realiza entre o instante em que o balde está totalmente cheio e o instante em que o equipamento se encontra junto ao equipamento de transporte.
- **Movimento de Descarga:** Movimento de descarga do balde para a caixa do equipamento de transporte.
- **Movimento de Viagem Vazio:** Grupo de movimentos que o equipamento de carga efectua-a, entre o instante que descarrega todo o seu material e o instante em que se encontra novamente em frente ao material desmontado, pronto a carregar o seu balde.

Com a divisão do ciclo elementar nos quatro movimentos anteriormente referidos, a metodologia de estudo torna-se mais simples, bem como a aquisição de dados em projecto reais. Ao nível matemático podemos definir o tempo do ciclo de elementar e um equipamento de carga, pela Equação 33.

$$TCER = TCER_C + TCER_{VC} + TCER_D + TCER_{VV} \quad (\text{Eq. 33})$$

$TCER$ = Tempo despendido para completar um ciclo elementar de Carga, em minutos

$TCER_C$ = Tempo, do Ciclo elementar de carga, despendido no movimento de Carga

$TCER_{VC}$ = Tempo, do Ciclo elementar de Carga, despendido no movimento de Viagem Carregado

$TCER_D$ = Tempo, do Ciclo elementar de Carga, despendido na Descarga

$TCER_{VV}$ = Tempo, do Ciclo elementar de Carga, despendido no movimento de Viagem Vazio

Sendo a actividade de carga do material desmontado, uma repetição de um determinado número de ciclos elementares de carga, e este último devido nos quatro movimentos apresentados anteriormente, é de fácil compreensão, que para a determinação do tempo de duração da actividade, se deve realizar uma temporização de cada um dos movimentos.

Para tal objectivo diferentes abordagens poderão ser admitidas, sendo a abordagem empírica e a abordagem matemática as mais aplicáveis. Quando se refere a uma abordagem matemática, pretende-se basear a metodologia de temporização em diferentes variáveis destes, como por exemplo, determinar o tempo de viagem, seja carregado ou vazio, a partir da sua velocidade de deslocação e da distância a ser percorrida. Esta abordagem é muito interessante, pois apresenta uma grande representatividade de cada movimento e permite um controlo muito grande sobre a velocidade dos equipamentos, que poderá variar com o tipo de

equipamento, e com a distância a ser percorrida, porém, apesar das suas vantagens, não se apresenta como uma abordagem muito eficaz para a temporização dos movimentos do ciclo elementar de carga, como será observado seguidamente, sendo escolhida uma abordagem empírica, mais simples, mas também ela representativa.

Para a determinação da duração dos movimentos de viagem carregado e viagem vazio, a abordagem empírica é sustentada em dados recolhidos em projectos anteriores. Tal sucede devido as pequenas distâncias percorridas pelos equipamentos de carga, comparativamente com os equipamentos de transporte. Estas distâncias reduzidas, muitas vezes difíceis de contabilizar, devido ao grande número de manobras, tornam difícil uma abordagem através da utilização dos valores de velocidade de deslocação do equipamento, neste caso com o balde cheio, sendo então, preferível basear o tempo desta actividade em dados recolhidos de projectos anteriores, ocorrendo apenas a diferenciação dos tempos para o tipo de equipamento de carga.

Como ocorre para os movimentos anteriores, para a carga e descarga, devido a serem movimentos relativamente curtos temporalmente e a ser muito complexa a sua análise matemática, pois não existem distancias percorridas nem velocidades de deslocação, como nos movimentos de viagem, é também utilizada uma abordagem empírica.

Pelo observado, caso se deseja obter informações sobre o ciclo elementar de carga, para os seus movimentos, deverão existir dados temporais sobre cada um dos movimentos, que deverão ter sido recolhidos em projectos anteriores para equipamentos similares ao que se deseja utilizar no projecto.

Conhecido o Ciclo Elementar de Carga, e os seus movimentos constituintes, torna-se essencial o estudo sobre as principais variáveis influenciadoras do tempo de duração de cada um dos movimentos e do ciclo elementar no seu todo. Ao nível dessas principais variáveis influenciadoras o volume a ser removido por ciclo de trabalho, a capacidade volúmica do balde do equipamento e o tipo de equipamento são aqueles em que se possui mais poder de escolha e controle.

- ❖ Volume a ser removido: A actividade de carga do material desmontado só está completa quando se dá a remoção total de todo esse material, logo, o volume de material desmontado por cada pega de fogo é um grande influenciador do tempo total da actividade de operação, influenciando directamente o número de ciclos elementares necessários que cada equipamento de carreamento terá de realizar. Quanto maior for a secção do túnel e o avanço provocado pelo desmonte, maior será o volume de material rochoso que terá de ser removido, portanto é de se esperar um maior número de ciclos elementares necessários, levando a um maior tempo de carga.
- ❖ Tipo de equipamento utilizado: Quando definidos o tipo de equipamento que será utilizado na carga do material desmontado, não são realizadas alterações na sequência de movimentos do ciclo elementar, mas sim nos tempos despendidos em cada um dos movimentos. Diferentes equipamentos, como a pá carregadora ou LHD's, realizam os

movimentos a diferentes velocidades, devidas às características intrínsecas de cada equipamento. Por exemplo o grupo de movimentos dentro do movimento de carga é diferente para os dois equipamentos, levando por isso a tempo diferentes. Tal sucede com as suas velocidades de deslocação, estando com os baldes vazios ou carregados, influenciando os tempos de viagem vazio e carregado, respectivamente. Tendo-se conhecimento desta variação de tempos, entre equipamentos, torna-se importante a aquisição de dados temporais para vários equipamentos, com o objectivo de melhor representar, no tempo de vida total do ciclo de trabalho e do projecto, a influência da escolha de diferentes equipamentos de carga.

Os equipamentos utilizados num projecto, como a escavação de um túnel, poderão apresentar elevados investimentos, não viabilizando que as trocas entre tipos de equipamentos, como passar de pás-carregadoras para LHD's, seja realizada com frequência dentro de um projecto. Para que durante um projecto não sejam necessárias alterações no tipo de equipamentos de carga, devido a problemas de eficiência, segurança ou de espaço, a escolha do tipo de equipamento a ser utilizado é efectuado com grande ponderação, antes da iniciação de cada actividade, para evitar problemas futuros.

- ❖ Capacidade volúmica do balde do equipamento: Para além dos diferentes equipamentos de carga que podem ser utilizados, estes são comercializados em vários modelos, onde a principal diferença entre eles é a capacidade volúmica do seu balde. Como visto anteriormente, o número de ciclos elementares que um equipamento de carga terá de realizar para encher completamente a caixa do equipamento de transporte é inversamente proporcional ao volume do seu balde, logo, quanto maior for o balde do equipamento, menor será o número de ciclos elementares necessários, e com isso menor será o tempo de remoção do material desmontado. Observando a expressão anterior, que calcula o número de ciclos elementares necessários, é visível que o volume da caixa do equipamento de transporte é uma variável importante, sendo está debatida mais á frente.

De referir, que para um mesmo modelo do equipamento poderão existir vários baldes adequados para o seu funcionamento, e que a troca de baldes pode ocorrer quando desejado, sendo o investimento no novo balde significativamente inferior quando comparado com a troca do equipamento. Este aspecto é importante, caso a escolha do balde ou até mesmo do equipamento de carga tenha sido não tenha sido a melhor para o projecto, pois poderá ser uma alternativa interessante, durante a vida do projecto, para melhor a eficiência da operação.

6.2.1.3 Duração da Actividade de Carga

Conhecido então o tempo necessário para se completar o ciclo elementar de um equipamento de carga, bem como as suas principais características e factores influenciadores, é possível conhecer o tempo total necessário para realizar esta actividade, levando em conta o número

de ciclos elementares que terão de ser realizados para remover todo o material desmontado e o número de equipamentos afectos à actividade, utilizando a Equação 34.

$$TR = \frac{NCER \times TCER}{NE_{rem}} \quad (\text{Eq. 34})$$

TR = Tempo despendido na Actividade de Carga

NE_{rem} = Número de equipamentos de carga

O tempo calculado anteriormente, para a actividade de Carga, é esperado como constante ao longo de toda a vida do projecto, pois não é expectável que os grandes factores influenciadores deste tempo variem. Como já observado o ciclo elementar de carga e a sua duração, são influenciados principalmente pelo volume desmontado ser removido, pelo tipo de equipamento e pela capacidade volúmica do seu balde. Estes parâmetros influenciadores, como é de esperar serão também eles influenciadores do tempo total da actividade de carga, no entanto existirão ainda os seguintes influenciadores do tempo da actividade:

- Número de Equipamentos: Como observamos na expressão anterior, o número de equipamentos de carga é um grande influenciador do tempo de remoção e, tal como os factores referidos, não é expectável que a sua variação ocorra ao longo de um projecto. Como sabido, a escolha do número de equipamentos de carga para trabalhar na frente de um túnel é influenciada pelas dimensões do túnel e relação com as dimensões dos equipamentos. Os equipamentos de carga, numa frente, devem poder realizar os seus movimentos de forma livre e segura, sendo que neste caso a utilização de apenas um equipamento seria a escolha mais vantajosa, contudo a opção por apenas um equipamento seria extremamente ineficiente e demorada, quando se é possível utilizar um maior número de equipamentos. Contudo é-se impossível escolher um infinito número de equipamento de carga, diminuindo drasticamente os tempos da actividade, devido as limitações de espaço de um túnel. Cada equipamento de carga irá ocupar determinado espaço da frente de um túnel, removendo espaço aos outros equipamentos, chegando-se a uma situação em que um determinado número de equipamentos iria impossibilitar o movimento da frente. Um estudo prévio da área disponível para o movimento dos equipamentos e das dimensões destes levará a escolha do número de equipamentos que produza uma maior eficiência com uma maior segurança, sendo que esta escolha é raramente alterado ao longo do projecto, visto a secção do túnel, principalmente a sua largura, não variar.
- Número de ciclos elementares: O número de ciclos elementares que terão de ser realizados para remover todo o material é um factor muito importante para a duração temporal da actividade, sendo que como já referido, este parâmetro é influenciado pelo volume a ser removido e pelo volume do balde do equipamento.

Como percebido pelo estudo dos principais parâmetros influenciadores do tempo da actividade, todos são passíveis de serem alterados, de forma a oferecer tempos da actividade interessantes, conforme o projecto. Apesar de existirem restrições nessas alterações, por exemplo, a capacidade volúmica do balde do equipamento é apenas alterado conforme as possibilidades oferecidas pelo fornecedor, a variação é ainda bastante relevante. Contudo, como esta actividade é extremamente independente dos equipamentos de carga, estes que incorporam a maioria dos parâmetros influenciadores (tipo, número, capacidade do balde) e que exigem um investimento monetário bastante significativo, é essencial um intensivo estudo previamente ao início da escavação do túnel, de forma a serem escolhidos, rigorosamente, os equipamentos a serem utilizados e as suas características. Tal ocorre para serem evitadas alterações ao longo da vida projecto, que obrigariam a investimentos avultados e desnecessários caso o estudo e a escolha tivessem sido feitos correctamente. Contudo pequenas variações do tempo da actividade podem ocorrer na realidade, que são impossíveis de ser estimados, pois não estão relacionados com as variáveis estudadas. Os tempos de cada movimento do ciclo elementar, descritos anteriormente, são baseados em observações empíricas, sendo efectuado a média para cada tipo de equipamentos, contudo em muitos dos casos

Como observado, para um projecto de escavação de um túnel, poderão ser utilizados diferentes equipamentos de carga, que são comercializados em diferentes dimensões e capacidades, como tal a escolha do equipamento de carga a ser comprado, devido ao investimento a ser realizado, deverá ser cuidada, seguindo os seguintes critérios:

- Volume de material a ser removido
- Tempo de carga em função do tempo total do ciclo de trabalho
- Dimensões do túnel, que influenciaram as dimensões do equipamento
- Área para manobra ou nichos disponíveis
- Capacidade volúmica dos baldes

Os critérios atrás apresentados são um grande apoio para a escolha dos equipamentos de carga e as suas características, contudo a escolha deverá ser realizada levando em conta uma componente experiencial, baseada em trabalhos anteriores, que permitem uma boa comparação com o projecto em causa.

Para este trabalho a inclusão da informação sobre os diferentes equipamentos, possibilitando ao utilizador do utilitário informático, escolher entre o equipamento desejado para o seu projecto seria extremamente benéfico, contudo para que tal fosse possível era necessária a informação sobre a duração dos ciclos elementares de cada equipamento de transporte, pois como cada um destes, apresenta diferentes características, os tempos dos ciclos elementares nunca poderiam ser similares. A recolha desta informação seria facilmente adquirida, contudo na actualidade, a ausência de projectos de escavação de túneis é uma realidade, não possibilitando a recolha de dados essenciais. Desta forma, no *software*, apenas será disponibilizado como equipamento de carga a pá carregadora.

6.2.1 Actividade de Transporte

Ocorrendo paralelamente à actividade de Carga, dentro da operação de Limpeza da Frente, dá-se o transporte do material desmontado entre a frente do túnel e a escombreira, onde este será despejado. A actividade de transporte pode ser realizada de diversas formas, ou através de telas transportadoras, estas menos comuns para projectos de escavação de túneis, ou por equipamento especializados, podendo estes deslocar-se sobre pneus ou até mesmo sobre carris, que possuem uma caixa, com uma determinada capacidade volúmica, que é enchida pelos equipamentos de carga. Estes equipamentos, comparativamente com os equipamentos de carga, apresentam de forma geral ciclos elementares mais longos, devido às grandes distâncias que têm de cobrir.

6.2.1.1 Equipamentos de Transporte

Neste trabalho o único tipo de equipamento de transporte a ser referenciando serão os camiões, devido à sua preponderância nos projectos de escavação de um túnel, pois são estes os equipamentos preferenciais. Ao contrário do que ocorre para os equipamentos de carga, em que era interessante a inclusão de informação, no software, sobre vários tipos de equipamentos, para a actividade de transporte tal não sucede, pois sem dúvida os camiões são as unidades de transporte mais utilizadas. Na Figura 57, podemos observar um camião, comercializado pela Atlas Copco, aconselhado para trabalhos subterrâneos, como a escavação de túneis.



Figura 57 – Camião subterrâneo: Minetruck MT6020 da Atlas Copco (www.atlascopco.pt)

Os camiões utilizados neste tipo de projectos, principalmente quando utilizados em harmonia com os equipamentos de carga, oferecem uma grande eficiência e rapidez na actividade, pois quando são obtidos pelo mesmo fornecedor e após um estudo intenso, ambos os equipamentos apresentam dimensões, áreas de trabalho e capacidades volúmicas em sintonia.

Tal como para os equipamentos de carga, a escolha da unidade de transporte deve ser realizada seguindo vários parâmetros, sendo que um dos principais é que este possua uma

dimensão, normalmente traduzida pela capacidade volúmica da sua caixa, menor que a área da secção do túnel, para que possa entrar. Para esta escolha, como será observado, o utilitário não imporá nenhum valor, devendo o utilizador estar atento a possíveis incongruências. De referir ainda, que o utilitário admitirá, que os camiões utilizados, apresentaram as mesmas características.

6.2.1.2 Ciclo Elementar de Transporte

As grandes vantagens dos camiões são a sua versatilidade e adaptabilidade a alterações das características do projecto. No mercado, dois grandes tipos de camiões são passíveis de serem encontrados. Os articulados, que são especialmente eficiente em condições de trabalho difíceis, apresentam uma grande manobrabilidade, porém permitem apenas movimentar entre 10 e 50 toneladas de material por viagem. O outro tipo ode camiões, são os rígidos, que apesar de possuírem uma menor manobrabilidade, permitem movimentar mais de 50 toneladas por viagem.

Tal como os equipamentos de carga, os equipamentos de transporte, neste caso o camião, realizam determinados movimentos, que no seu conjunto constituem o seu ciclo elementar de trabalho, que engloba todos os movimentos realizados entre o início do carregamento da sua caixa e a chegada à frente de desmonte para novo carregamento. Podemos então dividir o ciclo elementar de um camião na seguinte sequência de movimentos:

1. Carregamento da caixa do camião, por parte dos equipamentos de carga
2. Viagem carregado, entre a frente de desmonte e a escombreira, e colocação do camião na fila de espera, caso esta exista
3. Espera na fila de descarregamento
4. Descarga da caixa do camião para a escombreira
5. Viagem vazio, realizada entre a escombreira e a frene de desmonte, e posicionamento para novo carregamento da caixa
6. Espera na fila de carregamento, junto à frente de desmonte

Contudo, outros autores, realizam a divisão do ciclo elementar de um equipamento de transporte, durante a sua actividade, em outros movimentos, como se pode observar na Figura 58.

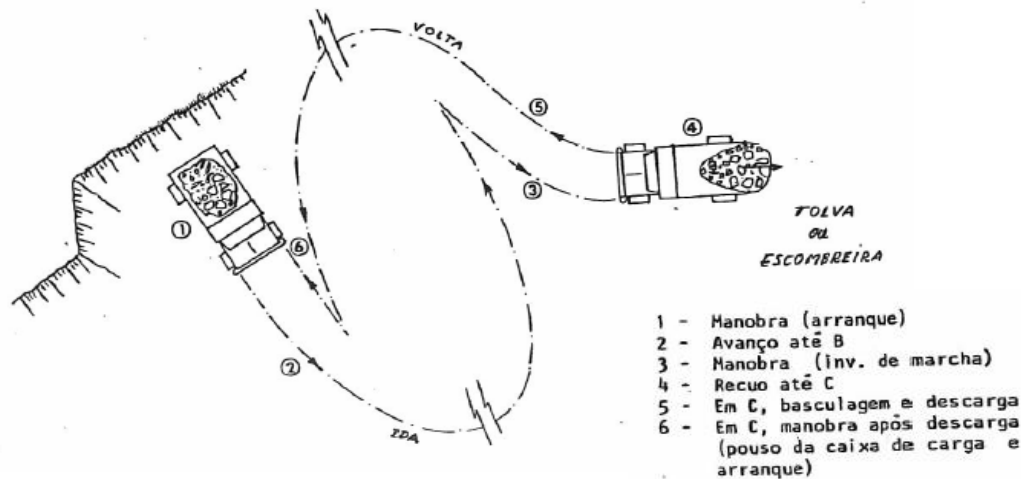


Figura 58 – Esquematisação de um ciclo elementar de uma unidade de transporte (Miranda, H. S. 2000)

Devido a esta possibilidade de dividir o ciclo elementar em diferentes movimentos, que podem variar de autor para autor, tal como com o objectivo de simplificar o ciclo elementar, foi seguida a metodologia efectuada para a actividade de Carga, combinando os vários movimentos em apenas quatro movimentos, que representaram igualmente o ciclo elementar. Optou-se então pela seguinte divisão do ciclo elementar do equipamento:

- **Carga:** Como o nome indica, neste movimento a caixa do camião é carregada, com material desmontado, pelos equipamentos de Carga. Começa no instante em que o camião é carregado pela primeira vez e termina quando se dá o seu total carregamento.
- **Viagem Carregado:** Conjunto de movimentos realizado entre o término do enchimento total da caixa do camião e a iniciação da descarga do material desmontado na escombreira. Este movimento engloba todas as manobras efectuadas, sendo o principal movimento a deslocação entre a frente de desmonte e a escombreira.
- **Descarga:** Sequência de movimentos, principalmente da caixa do camião, que levam à descarga de todo o material rochoso desmontado para a escombreira.
- **Viagem Vazio:** Movimentos que se efectuam entre o fim da descarga e o início do carregamento. Engloba todas as manobras e a viagem, com a caixa vazia, entre a escombreira e a frente de desmonte, bem como o posicionamento do camião na frente de desmonte, pronto para ser carregado.

Como referido na Actividade de Carga, os tempos “mortos” devido a esperas em filas, a paragens e cruzamentos, também afectos aos equipamentos de transporte são contabilizados na determinação da duração da operação, sendo apenas assumidos quando introduzido o factor rendimento no projecto.

Com esta diferente abordagem do ciclo elementar de uma unidade de transporte, foi desejada uma simplicidade de movimentos que permite-se um estudo mais simplificado do ciclo elementar, sem se perder os pontos fulcrais. Esta abordagem permite também uma recolha de dados mais eficientes, devido à menor divisão de movimentos que necessitam ser contabilizados.

Apesar de o novo ciclo elementar da unidade de transporte, se assemelhar bastante com o ciclo elementar da unidade de carga, ao nível prático várias diferenças podem ser descortinadas. Essas diferenças ao nível do ciclo elementar, bem como as metodologias utilizadas para quantificar os tempos de cada um dos movimentos será abordado mais à frente.

Tal como sucede para a actividade de carga, a actividade de transporte é findada apenas quando todo o material desmontado é transportado para a escombreira. Para que tal seja possível terão de ser realizadas um determinado número de viagens, ou melhor dizendo, um determinado número de ciclos elementares. A correcta determinação do número de ciclos elementares necessários é essencial para a estimação do tempo desta actividade, logo de toda a operação e projecto. Para essa determinação é utilizada a Equação 35, relacionando o volume desmontado e a capacidade volúmica da caixa do camião.

$$NCET = \frac{\text{Volume Total Desmontado}}{\text{Volume Caixa Equip.Transporte}} \quad (\text{Eq. 35})$$

$NCET$ = Número de ciclos elementares de transporte, necessários para transportar todo o material desmontado num ciclo de trabalho

Determinando-se o tempo despendido no ciclo elementar da unidade de transporte utilizando-se a Equação 36, que contabiliza o tempo dos quatro movimentos anteriormente:

$$TCET = TCET_C + TCET_{VC} + TCET_D + TCET_{VV} \quad (\text{Eq. 36})$$

$TCET$ = Tempo despendido para completar um ciclo elementar de Transporte, em minutos

$TCET_C$ = Tempo, do Ciclo elementar de transporte, despendido na Carga

$TCET_{VC}$ = Tempo, do Ciclo elementar de transporte, despendido no movimento de Viagem Carregado

$TCET_D$ = Tempo, do Ciclo elementar de transporte, despendido na Descarga

$TCET_{VV}$ = Tempo, do Ciclo elementar de transporte, despendido no movimento de Viagem Vazio

Conhecido o número de ciclos elementares do equipamento de transporte necessários e a expressão que traduz a duração de um ciclo elementar, poderá parecer simples a estimação do tempo despendido nesta actividade, através da Equação 37, à qual é adicionada informação sobre o número de equipamentos.

$$TT = \frac{NCET \times TCET}{NE_{trans}} \quad (\text{Eq. 37})$$

TT = Tempo despendido na Actividade de Transporte

NE_{trans} = Número de equipamentos de transporte

Contudo a grande dificuldade desta estimação, deve-se com a determinação dos tempos constituintes do ciclo elementar do equipamento. Como observado, para o ciclo elementar de carga, uma abordagem empírica era suficiente para os quatro movimentos constituintes, todavia, no ciclo elementar de transporte, dependendo do movimento, diferentes metodologias são aplicadas. Especificamente são aplicadas três metodologias de estudo dos movimentos do ciclo elementar e a suas respectivas temporizações, de forma a facilitar esse estudo, em função das características dos seguintes movimentos:

- Tempo do movimento de Carga:
Ao nível do tempo de duração do movimento de carga, do ciclo elementar da unidade de transporte, podemos realizar a sua concordância com o ciclo elementar das unidades de carga, visto que, o tempo que um camião demorará a ser carregado está intimamente correlacionado ao número necessário de pás do equipamento de carga para encher a caixa de um equipamento de transporte e ao tempo de um ciclo elementar dos equipamentos de carga, por outras palavras, o tempo de carga da caixa de um camião será semelhante ao tempo de um ciclo elementar da unidade de carga multiplicando o números de pás que será necessário para a encher a sua caixa, como observado na Equação 38.

$$TCET_C = TCER \times NCER_{Trans} \quad (\text{Eq. 38})$$

Esta constatação leva a que na contabilização do tempo total do ciclo elementar de um equipamento de transporte, dentro de um ciclo de trabalho, o tempo de carregamento do camião não seja tomado em consideração, pois este já é assumido no tempo de remoção. Caso o tempo de carga fosse contabilizado, iria ocorrer uma multiplicação deste tempo, que dentro de um ciclo de trabalho poderia ter uma baixa significância, mas que multiplicado por todos os ciclos de trabalho que ocorrem para que um túnel seja totalmente construído poderia apresentar erros significativos na estimação temporal da construção de um túnel.

- **Tempo do movimento de Descarga:**
Para o Tempo de Descarga, será utilizada uma metodologia empírica, baseada em dados recolhidos de outros projectos. Tal metodologia foi preferida, devidos às características do movimento, rápido e curto, não existindo grandes possibilidades de o estudar matematicamente. Como tal, este tempo ser baseado em dados anteriores é a melhor solução.
- **Tempo dos movimentos de Viagem:**
Os movimentos referentes às viagens, constituem os ciclos elementares de ambos os equipamentos, de carga e transporte, contudo, devido às suas diferentes características, deve-se realizar uma abordagem diferenciada no estudo. Para as unidades de carga, devido às viagens efectuadas pelos equipamentos serem muito curtas, comparativamente com as viagens dos equipamentos de transporte, sendo muitas das vezes difícil definir distâncias percorridas, é escolhida uma abordagem empírica, como observando anteriormente. Contudo para as unidades de transporte, é possível utilizar uma abordagem mais científica, trabalhando-se com as distâncias percorridas pelos equipamentos e com as suas velocidades de deslocação. A velocidade de deslocação dos equipamentos de transporte é uma informação facilmente recolhida com os comerciantes dos equipamentos, que tem a sua disposição informações sobre de vários equipamentos, dependendo das suas dimensões.

6.2.1.3 Viagens dos equipamentos de transporte: abordagem científica

Pelo exposto anteriormente, os tempos dos movimentos “Viagem Vazio” e “Viagem Carregado” dos equipamentos de transporte serão abordados de uma forma matemática, baseado em várias variáveis manipuláveis. Apesar de esta metodologia ser mais complexa, é compensada com o acréscimo de fiabilidade e liberdade de manipulação, pois existe a possibilidade de alterar diferentes *inputs* ajudar na estimação pretendida. Esta abordagem é também necessária para resolver um problema complexo, que advém do sucessivo crescimento da distância dos percursos que terão de ser realizados pelas unidades transportadoras, à medida que a construção do túnel avança.

Para a estimação dos tempos de viagem, realizada com a caixa cheia ou vazia de material rochosos desmontado, por parte das unidades de transporte, é necessária, para além do conhecimento da velocidade de deslocação dos equipamentos, a estimação das distâncias percorridas. Contrariamente ao que ocorre na actividade de Carga, em que a distância percorrida pelas unidades de carga é significativamente igual em todo o projecto, visto que o equipamento de transporte poderá, salvo raras excepções, se situar à mesma distância do equipamento de carga, em todos os ciclos de trabalho do projecto, a distância percorrida pelos equipamentos de transporte aumenta de ciclo de trabalho para ciclo de trabalho ao longo de todo o projecto, isto é, quanto mais a construção do túnel avançar, mais metros terão de ser percorridos pelos camiões de transporte, visto que a frente livre de desmonte se afastará sucessivamente da boca do túnel, bem como da escombreira.

Com este constante crescimento da distância a percorrer pelas unidades de transporte, correspondente ao somatório sequencial de novos metros de novo túnel, equivalentes ao avanço provocado pelo desmonte de uma pega de fogo, o tempo do ciclo elementar destes aumentara sucessivamente, devido ao crescimento das parcelas referentes ao Tempo de Viagem Vazio e ao Tempo de Viagem Carregado. É então fundamental encontrar-se uma via de contabilizar este constante crescimento da distância percorrida e consequentemente dos tempos de viagem.

Reflectindo-se sobre as diferentes distâncias percorridas pelos camiões, pode-se concluir que a mínima distância percorrida por estes será a distância entre a escombreira e a boca do túnel, correspondente ao primeiro ciclo de trabalho de todo o projecto, enquanto a máxima distância percorrida será o somatório entre a distância entre a boca do túnel e a escombreira e o comprimento total do túnel, verificado após a conclusão deste. Logramos então compreender que o percurso realizado entre a escombreira e a boca do túnel constituirá sempre parte dos percursos realizados pelas unidades de transporte, independentemente do estado de avanço do projecto. Com este pensamento em mente, torna-se possível realizar a divisão de todas as viagens percorridas, com o propósito de facilitar o estudo deste problema, nos dois seguintes troços:

- **Escombreira – Boca do Túnel**

Este troço corresponde à distância percorrida entre a escombreira e a boca do túnel. Como visto previamente, esta é a menor distância percorrida pela unidade de transporte durante a actividade de transporte, sendo realizada obrigatoriamente pelos camiões no desenrolar da actividade de transporte, independentemente do fase de construção do túnel. Por outras palavras, este troço do percurso será percorrido pelos camiões em todas as suas viagens, com caixa vazia ou carregada, em todas as actividades de transporte de qualquer um dos ciclos de trabalho, constituintes do projecto. Seguindo o raciocínio anterior, como durante toda a vida do projecto a distância entre as duas estruturas, escombreira e boca do túnel, não é alterada, é-se possível assumir esta como constante durante todo o projecto, para qualquer um dos ciclos de trabalho do túnel.

$$DT_{E-B} = \textit{Constante} \quad (\text{Eq. 39})$$

DT_{E-B} = Distância percorrida entre a escombreira e a boca do túnel

- **Boca do Túnel – Frente de Desmonte**

Diferentemente ao outro troço do percurso, este não poderá ser considerado constante, pois será este que representará o crescimento sucessivo da distância percorrida pelas unidades de transporte, em conformidade com o sucessivo avanço do projecto, até ao seu término.

Como referido o túnel é escavado pelo sucessivo desenrolar de ciclos de trabalho, que tem como principal função abrir pequenas parcelas do comprimento total do túnel. É desejado que em cada ciclo um novo comprimento do túnel seja aberto, correspondendo ao avanço provocado pelo desmonte de uma pega de fogo, que está directamente ligado ao comprimento da pega de fogo. De uma forma mais simples, de um ciclo de trabalho para o ciclo de trabalho seguinte o comprimento deste troço do percurso aumentará o comprimento correspondente ao avanço originado pelo desmonte da pega de fogo, representado pelo avanço previsto.

Matematicamente, a criação da expressão que represente este troço apresenta-se mais complexa, visto depender do avanço do projecto. Inicialmente torna-se importante criar um mecanismo que represente esse avanço do projecto, para tal, devermos primeiramente obter conhecimento sobre o número total de ciclos de trabalho que terão de ser realizados, podendo este ser determinado pela Equação 40.

$$CT = \frac{C_{túnel}}{AP} \quad (\text{Eq. 40})$$

CT = Número de Ciclos de trabalho necessários para realizar a total escavação do túnel

$C_{túnel}$ = Comprimento total desejado para o túnel a ser aberto

AP = Avanço previsto, provocado pelo desmonte de uma pega de fogo

Conhecendo-se então o número de ciclos de trabalho previsto para terminar o projecto, relacionamos um valor de índice do seguinte modo: $i = CT - 1$. De forma geral obtemos a seguinte relação entre o nosso índice e o número de ciclos de trabalho:

Tabela 24 – Relação entre o número de ciclos de trabalho de um projecto e o índice i

Valor Índice	Ciclo de Trabalho (CT)
0	1
1	2
⋮	⋮
CT-1	CT

A criação deste índice, representativo do avanço do projecto torna-se fundamental para o cálculo da distância a percorrer, pelas unidades de transporte, no troço entre a boca do túnel e a frente de desmonte. No caso do outro troço do percurso, entre a escombreira e a boca do túnel, este índice não é necessário, devido à sua característica constante ao longo de todo o projecto.

Outra vantagem do índice de trabalho ocorre para o primeiro ciclo de trabalho. Quando se dá o primeiro ciclo de trabalho, correspondente ao primeiro desmonte da pega de fogo, ainda não se deu nenhum avanço do túnel, pois os trabalhos ocorrem na boca do túnel, logo, sendo o índice correspondente a este ciclo de trabalho o valor nulo (zero), torna-se mais simples para os estudos que se seguem.

Sendo então o índice i representativo do avanço do projecto, é necessário encontrar outra dado que nos forneça a informação sobre o comprimento que será acrescido ao percurso, de ciclo de trabalho para ciclo de trabalho. Neste caso como referido, o incremento sucessivo de comprimento do túnel será representado pelo avanço previsto, provocado pelo desmonte de cada pega de fogo. Com estes dois dados podemos então criar a Equação 41, que traduza a distância entre a boca do túnel e a frente de desmonte, para um determinado ciclo de trabalho.

$$DT_{B-F}^i = i \times AP = (CT - 1) \times AP \quad (\text{Eq. 41})$$

i = Índice representativo da evolução de um projecto de escavação de túnel

CT = Número de ciclos de trabalho necessários para completar um projecto de escavação de túnel

AP = Avanço provocado pelo desmonte de uma pega de fogo, em metros)

DT_{B-F}^i = Distância do percurso Boca do túnel – Frente de desmonte, em função do progresso do projecto, em metros

Percebendo-se que a distância total, entre a escombreira e a frente de desmonte, é o somatório da distância entre a escombreira e a boca do túnel e a distância entre a boca do túnel e a frente de desmonte, podemos obter a Equação 42, que nos possibilita conhecer, para

qual quer ciclo de trabalho dentro do projecto, a distância que será percorrida pelos equipamentos de transporte, entre a escombreira e a frente de desmonte:

$$DT_{E-F}^i = DT_{E-B} + DT_{B-F}^i = DT_{E-B} + i \times AP = DT_{E-B} + (CT - 1) \times AP \quad (\text{Eq. 42})$$

DT_{E-F}^i = Distância a percorrer pelas unidades de transporte, entre a escombreira e a frente de desmonte, para um determinado ciclo de trabalho dentro do projecto

Observando a expressão anterior, corroborando o referido previamente, caso se pretenda conhecer a distância a percorrer pelos equipamentos de transporte no início do projecto, isto é, no primeiro ciclo de trabalho, poderemos observar:

$$CT = 1 \rightarrow i = 1 - 1 = 0 \rightarrow DT_{B-F}^0 = 0 \times AP = 0$$

$$DT_{E-F}^0 = DT_{E-B} + 0 = DT_{E-B}$$

Conhecidas as distâncias percorridas pelos equipamentos de transporte, é possível estimar o tempo gasto nos movimentos Viagem Vazio e Viagem Carregado, de um ciclo elementar, para um determinado ciclo de trabalho do projecto. Para podermos então estimar o Tempo de Viagem Vazio (Eq. 43) e Carregado (Eq. 44), para além das distâncias percorridas são necessárias as informações sobre as velocidades dos equipamentos, nas duas condições, que como referido são geralmente facultadas pelo fornecedor e/ou comerciante dos equipamentos.

- Tempo de Viagem Vazio:

$$TCET_{VV}^i = \frac{DT_{E-F}^i}{vel_V} = \frac{DT_{E-B} + (CT-1) \times AP}{vel_V} \quad (\text{Eq. 43})$$

$TCET_{VV}^i$ = Tempo de viagem vazio do equipamento de transporte, para um determinado ciclo de trabalho

vel_V = Velocidade da unidade de transporte, quando possui a caixa vazia

- Tempo de Viagem Carregado:

$$TCET_{VC}^i = \frac{DT_{E-F}^i}{vel_c} = \frac{DT_{E-B} + (CT-1) \times AP}{vel_c} \quad (\text{Eq. 44})$$

$TCET_{VC}^i$ = Tempo de viagem carregado do equipamento de transporte, para um determinado ciclo de trabalho

vel_c = Velocidade da unidade de transporte, quando possui a caixa carregada

6.2.1.4 Duração da Actividade de Transporte

No poder das expressões anteriores, que constituem parte de todo o ciclo elementar de uma unidade de transporte, obtemos a Equação 45, sempre em função do ciclo de trabalho do projecto.

$$TCET^i = TCET_C + TCET_{VC}^i + TCET_D + TCET_{VV}^i \quad (\text{Eq. 45})$$

$TCET^i$ = Tempo de duração do ciclo elementar de transporte, para um determinado ciclo de trabalho do projecto.

Para um mesmo ciclo de trabalho, utilizando a Equação 46 é-se possível estimar o tempo total de transporte.

$$TT^i = \frac{NCET \times TCET^i}{NE_{trans}} \quad (\text{Eq. 46})$$

TT^i = Tempo total despendido na actividade de transporte, para um determinado ciclo de trabalho, pertencente ao projecto

Examinado a expressão prévia, podemos compreender que entre cada ciclo de trabalho, o factor diferenciador dos diferentes tempos de carga serão os tempos de Viagem Vazio e Carregado, visto que os tempos de carga e descarga, do equipamento, dentro de cada ciclo elementar não varia, bem como o número de ciclos elementares de transporte necessários para remover o material da frente de desmonte, pois este volume será, de ciclo para ciclo aproximadamente semelhante.

Devido a esta crescente diferença entre os tempos de transporte de ciclo para ciclo, muitas das vezes é preferível olhar para a média do tempo de transporte de todo o projecto ou por outro lado observar o tempo total despendido no transporte no projecto. Tornando o processo mais simplificado, devera-se começar por determinar o tempo total despendido durante o projecto, nas viagens dos equipamentos vazios (Eq. 47) e carregados (Eq. 48).

- Tempo de Viagem Vazio no Projecto:

$$TCET_{VV}^{proj} = \frac{NCET \times \sum_0^i \frac{DT_{E-F}^i}{vel_V}}{NE_{trans}} = \frac{NCET}{NE_{trans}} \times \sum_0^i \frac{DT_{E-B} + (CT-1) \times AP}{vel_V} \quad (\text{Eq. 47})$$

$TCET_{VV}^{proj}$ = Tempo despendido pelos equipamentos de transporte, no movimento “Viagem Vazio”, ao longo de todo o projecto

- Tempo de Viagem Carregado no Projecto:

$$TCET_{VC}^{proj} = \frac{NCET \times \sum_0^i \frac{DT_{E-F}^i}{vel_C}}{NE_{trans}} = \frac{NCET}{NE_{trans}} \times \sum_0^i \frac{DT_{E-B} + (CT-1) \times AP}{vel_C} \quad (\text{Eq. 48})$$

$TCET_{VC}^{proj}$ = Tempo despendido pelos equipamentos de transporte, no movimento “Viagem Carregado”, ao longo de todo o projecto

Conhecendo-se as expressões anteriores, podemos obter as Equação 49 e 50, representativas do Tempo Total despendido no transporte, durante todo o projecto.

$$TT^{projecto} = \frac{CT \times NCET}{NE_{trans}} \times [TCET_C + TCET_D] + TCET_{VV}^{proj} + TCET_{VC}^{proj} \quad (\text{Eq. 49})$$

$$TT^{projecto} = \frac{CT \times NCET}{NE_{trans}} \times [TCET_C + TCET_D] + \sum_0^i \frac{DT_{E-B} + (CT-1) \times AP}{vel_C} + \sum_0^i \frac{DT_{E-B} + (CT-1) \times AP}{vel_V} \quad (\text{Eq. 50})$$

$TT^{projecto}$ = Tempo total despendido na actividade de transporte, durante todo o projecto

Para obtermos então a média do tempo despendido, durante toda a vida do projecto, simplesmente temos de realizar a divisão do Tempo Total de Transporte pelo número total de ciclos de trabalho, como observado na Equação 51.

$$TT^{médio} = \frac{TT^{projecto}}{CT} \quad (\text{Eq. 51})$$

$TT^{médio}$ = Tempo médio despendido na actividade de transporte, ao longo de todo o projecto

O estudo do tempo de duração da actividade de transporte, em função da sua média ao longo de todo o projecto, torna-se bastante útil, pois permitirá uma análise muito simplificada e clara do tempo de duração da actividade, que não seria possível, caso não fosse utilizada esta metodologia. Caso não fosse realizada uma análise da média, os valores observados seriam muito variáveis e, geralmente, muito diferentes, principalmente para projecto com um grande número de ciclos de trabalho. É importante referir que esta análise da média do tempo da actividade não interferirá com a duração do projecto que será estimada, isto é, não induzirá em erro, logo como será visto futuramente, a análise para a duração desta actividade é realizada sempre em função da sua média.

Conhecendo-se as várias formas para determinar os tempos despendidos na actividade de transporte, seja dentro de um ciclo de trabalho ou em todo o projecto, é importante analisar as principais variáveis influenciadoras do tempo desta actividade. Sendo elas:

- Número de Equipamentos de Transporte: Como observado em outras actividades e operações, o número de unidades afectas à sua função terão uma influência inversamente proporcional no tempo da actividade de transporte.
- Capacidade volúmica da caixa do equipamento: O volume da caixa do equipamento ditará a quantidade máxima de material que o equipamento poderá transportar, sendo que a razão entre esta capacidade volúmica e o volume total a desmontar influenciará o número de ciclos elementares necessários para remover todo o material desmontado. Sendo assim, para um mesmo volume de material desmontado, equipamentos com uma maior capacidade volúmica de caixa, necessitaram de realizar um menor número de ciclos elementares, levando teoricamente a um menor tempo de transporte, porém, deverá ser levada em conta velocidade de transporte dos equipamentos, pois equipamentos com uma capacidade de transporte terão velocidades, principalmente carregados, menores.

- Volume desmontado por pega de fogo: Relacionado com a capacidade volúmica da caixa do equipamento, o volume desmontado tem influência no número de ciclos elementares das unidades de transporte, sendo a relação directamente proporcional. Se comparados dois projectos similares, em que apenas o volume desmontado de pega de fogo variará, é de se esperar um menor tempo de transporte, principalmente por ciclo, no projecto com menor volume de material rochoso desmontado por cada de fogo.
- Distância entre a Escombreira e a Boca do Túnel: Como observado nas expressões, em cada viagem realizada pelas unidades de transporte, esta distância será percorrida duas vezes no percurso de um ciclo elementar, como tal a sua influência no tempo de transporte será decisiva. Quanto mais afastada a Escombreira se situar da Boca do Túnel, maior será o percurso a ser realizado pelos camiões, ressalvando que esta distância é a mínima possível a ser percorrida, logo, para as mesmas velocidades de deslocação, quanto maior for a distancia da boca do túnel à escombreira, maior será o tempo afecto aos movimentos de Viagem Vazio e Viagem Carregado, e por seguinte maior será o tempo de transporte.
- Tempo da actividade de Carga: Como observado, o tempo de Carregamento, dentro do ciclo elementar dos equipamentos de transporte, é igual ao tempo total que os equipamentos de carga demoram a encher a caixa de uma unidade de transporte, desta forma, o tempo da actividade de transporte será influenciado pelo tempo da actividade de Carga e das suas variáveis.
- Comprimento final do túnel: O comprimento desejado do túnel, após terminada a sua construção, influência de forma directa e proporcional o tempo da actividade de transporte, principalmente quando contabilizado para todo o projecto. Quanto maior for o túnel, maior será a distância a percorrer pelos camiões no segundo troço do seu percurso elementar, portanto, para velocidades similares, quanto maior for este comprimento, maior será o tempo de Viagem, tanto carregado como vazio, do equipamento, aumentando o tempo da actividade de transporte.
- Velocidades de deslocação dos equipamentos: Devido à abordagem matemática aplicada para a determinação dos tempos da actividade, em detrimento de uma abordagem empírica, baseada em informações e experiencia anteriores, as velocidades dos equipamentos, tal como as distâncias que este percorrera, são extremamente importantes para os tempos da actividade. Apesar de apenas ser assumidos, para este trabalho, camiões como os equipamentos utilizados, variações nas velocidades podem ocorrer.

Um dos principais influenciadores da velocidade dos equipamentos é a sua dimensão, traduzida pela capacidade volúmica da caixa do equipamento. Apesar de ser sempre admitido o uso de camiões, estes podem ser comercializados por vários empresas e em vários modelos, apresentando várias diferenças eles, mesmo dentro da mesma

empresa. A capacidade da caixa de transporte é uma dessas principais diferenças. Caixas de transporte de capacidade volúmica superior estão associadas, logicamente, a equipamentos de dimensões e peso maiores, levando a velocidades de locomoção inferiores devido ao peso acrescido, relacionado com aumento da capacidade de transporte. Muitos fabricantes de equipamento, realizam alterações ao nível da mecânica, principalmente no motor, para os equipamentos de maiores dimensões e peso, de forma ao equipamento obter velocidades satisfatórias.

Como observado nas expressões anteriores, as velocidades de locomoção são divididas, sendo importante efectuar a diferenciação entre a velocidade do equipamento carregado e a velocidade do equipamento vazio. Como é de supor a velocidade do equipamento carregado será substancialmente menor que a velocidade do equipamento vazio, devido ao acréscimo de peso, originado pelo transporte do material rochoso desmontado. Sendo que quanto maior for o volume de material transportado, relacionado com o volume da caixa de transporte, menor será a velocidade do equipamento carregado.

As velocidades dos equipamentos, como referido anteriormente, são fornecidas pelos comerciais, sendo os dados apresentados fiáveis, contudo, é importante basear as velocidades dos equipamentos em dados empíricos e em experiencias previas com os equipamentos, pois poderá existir discrepância entre as velocidades teóricas e reais dos equipamentos, principalmente devido a degradação do camião, pelo uso e pelo tempo. A degradação do camião, pelo uso e pelo tempo, poderá também ocorrer durante o projecto, principalmente quando este tem uma grande extensão no tempo, como tal uma manutenção periódica e de qualidade do equipamento é essencial durante o projecto, não permitindo variações das velocidades de deslocação durante o projecto, que poderão levar a erros no tempo real da actividade de transporte, logo no tempo de vida do projecto, quando comparado com os valores estimados.

Ainda quanto aos valores fornecidos pelos comerciais, estes são referentes, geralmente, a movimentações horizontais, em que os camiões não necessitam de realizar subidas nem descidas acentuadas. Como tal, caso o túnel que desejamos estudar, não seja horizontal, é importante possuir valores das velocidades nestas condições, principalmente porque as velocidades dependerão fortemente da inclinação do túnel, pois quanto maior está for, menor será a velocidade dos equipamentos. Nestes casos os comerciantes poderão possuir dados que poderão se rum bom apoio, porém dados adquiridos anteriormente dos equipamentos, serão extremamente relevantes.

6.2.2 Nichos: influência na Operação de Remoção do escombros

Pelo observado anteriormente, as actividades de Carga e Transporte ocorrem em simultâneo, até que o material desmontado seja removido e transportado, na sua totalidade, para a escombreira. Esta metodologia de carga, caracterizada pela organização estudada das duas actividades, poderá ser considerada, em certos casos, prejudicial na duração de todo o ciclo de trabalho, e do projecto no seu todo, visto que as operações precedentes, como a Marcação da pega de fogo, chegada do Jumbo de perfuração, que exigem um contacto directo com a frente de desmonte, apenas podem ser iniciadas quando a remoção de todo o material desmontado ocorra. Como observado previamente, quando a construção do túnel ainda não está numa fase muito avançada, isto é, a frente de desmonte não se encontra muito afastada da boca do túnel, a operação de Remoção do material, influenciada fundamentalmente pela actividade de transporte, não apresenta uma duração muito grande. Todavia à medida que a frente de desmonte se afasta da boca do túnel, a duração da actividade de transporte vai aumentando, devido às maiores distâncias a percorrer pelas unidades de transporte, o que obriga a maiores tempos de espera por parte das outras operações.

Com o conhecimento deste problema, ao longo dos anos foram apresentadas diferentes metodologias e estruturas que pudessem reduzir os tempos de espera, sucessivamente maiores, pela frente de desmonte disponível. Desta forma, com o objectivo de reduzir estes tempos de espera, e consequentemente o tempo total do projecto, foram introduzidos os nichos, ao longo de todo o comprimento do túnel. Os nichos são reentrâncias laterais, escavadas ao longo do túnel, que podem apresentar diversas funções, como:

- Local de manobras para os equipamentos
- Local de paragem de equipamentos
- Local de emergência ou segurança
- Local de cruzamentos das unidades de transporte
- Local de armazenamento de instrumentos e materiais utilizados nos trabalhos de construção
- Futura localização de estações de bombagem
- Local de armazenamento provisório do material desmontado

Como podemos observar, os nichos, como estruturas auxiliares vieram oferecer diferentes soluções para os trabalhos, contudo, para o problema em discussão, a sua última funcionalidade, de servir de local de armazenamento provisório do material desmontado, é sem dúvida aquela em que nos iremos debruçar.

A utilização dos nichos, como locais de armazenamento provisório do material desmontado, tem como principal objectivo realizar uma remoção do material desmontado da frente, ou como muitas vezes referido limpeza da frente, de uma forma muito mais rápida, com o propósito de possibilitar que as operações posteriores possam iniciar os seus trabalhos mais rapidamente, sem que existam longos tempos de espera. De uma forma muito simples, a limpeza da frente é realizada apenas pelos equipamentos de carga que movimentam o

material desmontado da frente de desmonte para o nicho previamente escavado, sendo que este ficará armazenado até que seja transportado para a escombreira. Como podemos compreender a limpeza da frente, isto é, a remoção do material desmontado entre a frente e o nicho mais próximo, será consideravelmente mais rápida do que a metodologia previamente estudada, em que ocorre o transporte imediato da frente para a escombreira, devido principalmente a dois factores:

- Distância entre a frente de desmonte e o nicho é consideravelmente inferior à distância entre a frente de desmonte e a escombreira
- A limpeza da frente é apenas realizada pelos equipamentos de carga, não sendo necessárias trocas de material entre os equipamentos de carga e de transporte

Como podemos compreender, a limpeza da frente disponibilizará a frente de desmonte livre num período de tempo muito mais curto, principalmente quando o projecto estiver numa fase avançada, o que permitirá que as operações seguintes possam ser realizadas sem grandes períodos de espera, o que diminuirá, como será observado futuramente, a duração de todo o projecto. Contudo é importante referir, que a utilização de nichos, apesar da desejada diminuição do tempo do projecto, poderá encarece-lo, pois a remoção do material rochoso desmontado torna-se mais dispendiosa. Tal acontece, porque o ciclo de carga e transporte sem nichos, é bastante mais simples e directo, não exigindo tantos movimentos dos equipamentos, sendo que quando utilizados nichos como estruturas de armazenamento provisório, os equipamentos terão de realizar um maior número de movimentos, levando ao seu maior desgaste e a um maior consumo de combustível.

Desta forma, entendemos então que a utilização dos nichos, como local de armazenamento provisório apresenta uma vantagem para todo o projecto, porém falta ainda referir os trabalhos seguintes, visto que, como referido, o nicho apenas permite armazenar o material desmontado de forma provisória. Após ser realizada a limpeza da frente, de forma a permitir, que as operações seguintes se iniciem rapidamente, o material que é armazenado no nicho terá de ser transportado para a escombreira, de forma a esvaziar o nicho, para que este possa ser utilizado no seguinte ciclo de trabalho. A remoção do material desmontado do nicho, denominada por Operação de Limpeza do Nicho, não apresenta uma grande complexidade ao nível das actividades, pois de uma forma básica, o que irá suceder é uma operação semelhante à operação “Remoção do material desmontado da frente”, com as actividades de carga e de transporte a serem exercidas em simultâneo, porém em vez de serem realizadas na frente de desmonte, são realizadas no nicho. Porém, sendo esta operação semelhante à previamente estudada, o que poderá influenciar todo o projecto é a sua relação com a operação de Limpeza da Frente. Ao nível da organização das duas operações, Limpeza da Frente e limpeza do Nicho, podemos encontrar as duas seguintes organizações:

- **Operação de Limpeza do a Frente e do Nicho em sequência:**
Nesta situação, a operação de Limpeza do Nicho apenas é removido quando concluída a operação de Limpeza da Frente. Nestas condições os equipamentos de carga que realizam a limpeza da frente, após o término desta, irão realizar a carga do material do nicho para os equipamentos de transporte. Na Figura 59 podemos

observar a organização dos trabalhos referidos anteriormente. Em A podemos observar a limpeza da frente de desmonte, em que a unidade de carga movimenta o material rochoso desmontado da frente até ao nicho, sendo que em B, são observáveis a sobreposição temporal de diferentes operações. Na frente de desmonte depois de esta estar livre, poderão ser realizadas as operações de Marcação, Perfuração, Carregamento com explosivo e a operação de Saneamento. Enquanto no nicho, ocorre a Operação de Remoção do escombro armazenado. Este material como referido é transportado para a escombreira, graças aos trabalhos das unidades de carga e transporte.

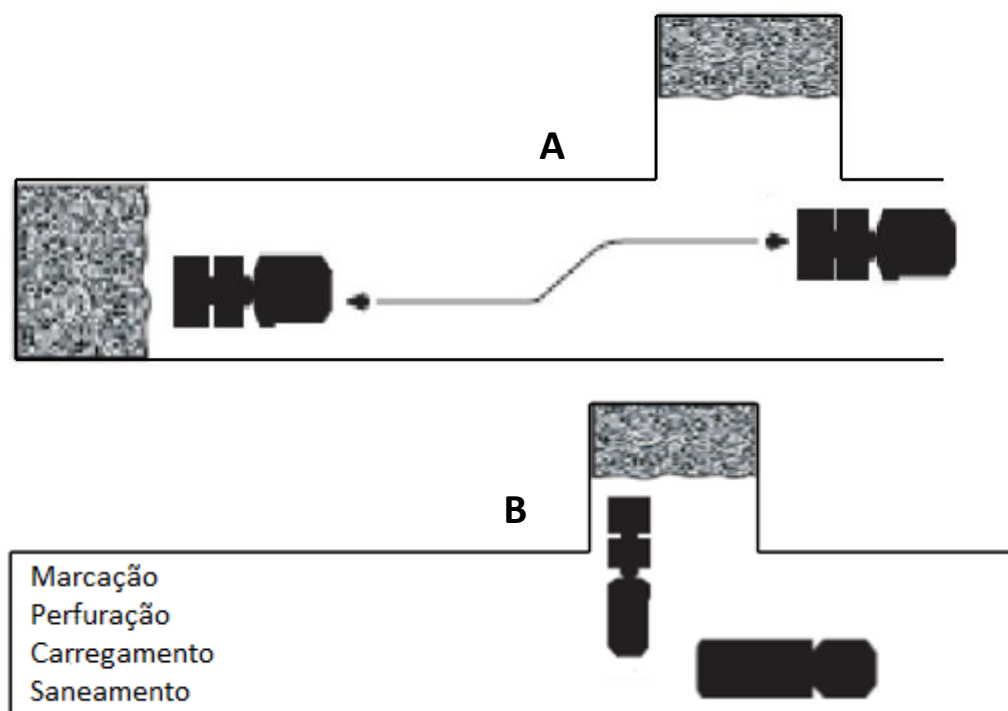


Figura 59 – Organização dos trabalhos, no caso de as operações de Limpeza da Frente e do Nicho serem realizadas em sequência

- **Operação de Limpeza da Frente e do Nicho em simultâneo:**

Com esta organização, ambas as operações ocorrem em simultâneo, isto é, enquanto se dá a limpeza da frente, simultaneamente ocorre a remoção do material que é armazenado no nicho. Observando a Figura 60 podemos compreender o conjunto de trabalhos que ocorre na frente de desmonte no nicho, de forma a estas duas operações serem executadas simultaneamente.

Facilmente se perceber, que com esta organização, serão necessários equipamentos de carga extra, pois o equipamento de carga que realiza a limpeza da frente não

poderá ser o mesmo que realiza a carga das unidades de transporte. Desta forma, esta organização implicará um investimento adicional em equipamentos. Outra das desvantagens desta organização são os possíveis congestionamentos nas imediações do nicho, pois nesta área existirão vários equipamentos em trabalho, principalmente os equipamentos de carga. Esta situação, exigirá um grande nível de coordenação dos equipamentos, de forma a manter a eficiência das operações interessantes, bem como reduzir problemas com a segurança.

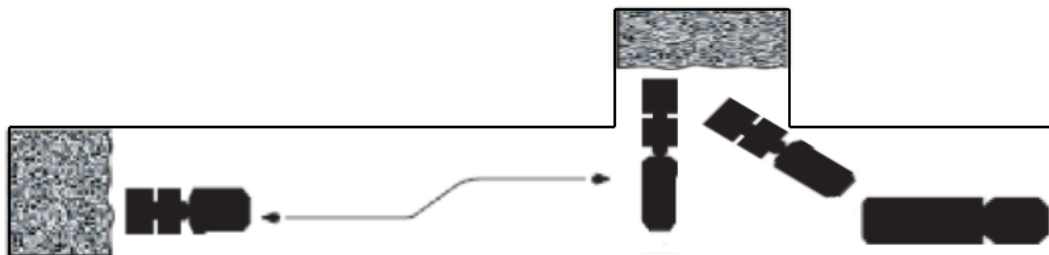


Figura 60 – Conjunto de trabalhos, nas situações em que ocorre a sobreposição temporal das operações de Limpeza da Frente e Limpeza do Nicho

Estudadas as duas organizações, das operações, passíveis de serem aplicadas quando se trabalha com nichos, rapidamente se compreende que a segunda organização, em que as operações ocorrem em simultâneo, apresentará uma duração significativamente mais curta.

6.2.2.1 Determinação temporal das Operações de Remoção utilizando Nichos

Compreendido o nicho como estrutura de apoio aos trabalhos de escavação de um túnel, principalmente a sua influência na Operação de Remoção do escombros da frente de desmonte, torna-se importante, tal como efectuado para todas as outras operações, realizar a “tradução matemática” a nível temporal das operações de remoção, ligadas a estas estruturas. Desta forma, com as expressões matemáticas produzidas, seremos capazes de determinar a duração temporal das diferentes operações, para que mais tarde sejam empregues na determinação da duração temporal de um ciclo de trabalho e do seu determinado projecto.

Inicialmente importa referir, que para as duas organizações apresentadas previamente, a determinação temporal das operações será semelhante, pois ambas as organizações são constituídas pelas mesmas operações, sendo apenas a sua organização distinta.

6.2.2.1.1 Operação de Limpeza da Frente

Inicialmente, é fundamental a desconstrução da operação, num ciclo elementar, que possibilite um estudo e temporização simples e eficiente. Seguindo a desconstrução realizada ao longo desta dissertação, foi-se possível desconstruir a operação no seguinte ciclo elementar, que como é do conhecimento, será repetido um número específico de vezes.

- **Movimento de Carga:** O equipamento realiza a carga do seu balde, com o material desmontado, presente na frente de desmonte
- **Movimento de Viagem Carregado:** Movimentos realizados após o total enchimento do balde, com material desmontado, e a chegada ao nicho, onde será realizada a descarga
- **Movimento de Descarga:** Descarga do material desmontado, presente no balde do equipamento, no nicho.
- **Movimento de Viagem Vazio:** Deslocação do equipamento, entre o nicho, após a descarga do material, e a frente de desmonte, para seja realizado, novamente, o enchimento do balde do equipamento

Como realizado anteriormente, para a determinação da duração temporal do ciclo elementar no seu todo, a temporização de cada um dos movimentos é a melhor solução. Para os Movimentos de Carga e Descarga, devido a serem semelhantes aos estudados anteriormente para actividade de Remoção “comum” será adoptada uma abordagem empírica, devido a facilidade de estudo e a fiabilidade conseguida dos dados.

Contudo, contrário o que sucedia com a actividade de carga “padrão”, nomeadamente para os Movimentos Viagem Vazio e Viagem Carregado, em que os equipamentos de carga apresentavam uma deslocação muito curta, sendo preferível uma quantificação matemática baseada em métodos empíricos, nesta situação tal abordagem não será efectuada, pois levaria a resultados erróneos. Uma abordagem matemática será então preferível, pois, como é compreensível, a distância a percorrer pelos equipamentos de carga será sucessivamente superior, pois a frente de desmonte, a medida que o túnel avança, se afastará cada vez mais do nicho, para onde o material terá de ser removido. Inicialmente, este caso apresenta algumas semelhanças ao problema estudado anteriormente, quando estudada a actividade de transporte e o sucessivo crescimento das distâncias a percorrer, porém, enquanto na actividade de transporte o crescimento era contínuo, ao longo de todo o túnel, nesta operações o crescimento ocorre apenas entre nichos, visto depois de construído um novo nicho, esse será utilizado para armazenar o material, e a distância entre a frente de desmonte o mesmo será “zerada”. Desta forma, inicialmente torna-se importante conhecer o número de nichos que serão construídos, admitindo-se que serão construídos com uma distância constante entre si, ao longo de todo comprimento do túnel.

$$NN = \frac{DN}{C_{Tunnel}} \quad (\text{Eq. 52})$$

NN = Número de Nichos a serem construídos

DN = Distância entre nichos, em metros

C_{Tunel} = Comprimento total do túnel, em metros

Na realidade, apenas serão construídos $NN - 1$, pois a boca do túnel para o software é assumida como um nicho. Que obviamente não será construído.

Após termos conhecimento do número de nichos, torna-se importante conhecer o número de ciclos de trabalho que serão realizados entre cada nicho, de forma ser controlada a evolução do projecto. Para tal, podemos utilizar a Equação 53.

$$CT_{Nicho} = \frac{DN}{AP} \quad (\text{Eq. 53})$$

CT_{Nicho} = Número de ciclos de trabalho a ser realizado por cada Nicho

AP = Avanço provocado pelo desmonte de uma pega de fogo, em metros

Tal como sucedeu com a actividade de transporte, o avanço do projecto, entre cada nicho, traduzido pelo número de ciclos de trabalho será relacionado com um índice j , de forma a facilitar a construção matemática

Tabela 25 – Relação entre o número de ciclos de trabalho referentes a um único nicho e o índice j

Valor Índice j	Ciclo de Trabalho ente Nichos (CT_{Nicho})
0	1
1	2
\vdots	\vdots
$CT_{Nicho} - 1$	CT_{Nicho}

Depois de criada a relação entre o número de ciclos e o índice podemos determinar a distância entre a frente e o nicho, usando a Equação 54.

$$DR_{N-F}^j = j \times AP = (CT_{Nicho} - 1) \times AP \quad (\text{Eq. 54})$$

DR_{N-F}^j = Distância percorrida entre a frente de desmonte e um determinado nicho, pelo equipamento de carga

j = Índice representativo da evolução do projecto, em relação a um determinado nicho

As expressões anteriores permitem que se determine a distância que será percorrida para um determinado ciclo de trabalho, dentro de um conjunto de ciclos de trabalho que será realizado respectivamente um Nicho. A partir dos dados calculados pelas expressões anteriores, e das informações sobre as velocidades de deslocação dos equipamentos de carga, podemos determinar os tempos despendidos a percorrer essas distâncias, quer esteja os baldes dos equipamentos vazios (Eq. 55) ou carregados (Eq. 56).

- Tempo de Viagem Vazio:

$$TCERF_{VV}^j = \frac{DT_{N-F}^j}{vel_V} = \frac{(CT_{Nicho}-1) \times AP}{vel_V} \quad (Eq. 55)$$

$TCET_{VV}^j$ = Tempo, em minutos, de viagem vazio do equipamento de carga, para um determinado ciclo de trabalho, entre a frente de desmonte e o nicho.

vel_V = Velocidade da unidade de carga, com o balde vazio, em metros por minutos.

- Tempo de Viagem Carregado:

$$TCERF_{VC}^j = \frac{DT_{N-F}^j}{vel_C} = \frac{(CT_{Nicho}-1) \times AP}{vel_C} \quad (Eq. 56)$$

$TCET_{VC}^j$ = Tempo, em minutos, de viagem carregado do equipamento de carga, para um determinado ciclo de trabalho, entre a frente de desmonte e o nicho.

vel_C = Velocidade da unidade de carga, com o balde carregado, em metros por minutos.

Conhecidos os tempos de viagem entre a frente de desmonte e o nicho, e assumindo que os tempos dos movimentos “Carga” e “Descarga” são adquiridos empiricamente, como efectuado para a actividade de Carga, podemos determinar o tempo de duração desta operação, para um determinado ciclo de trabalho, dentro de um nicho, utilizando a Equação 57.

$$TCERF^j = TCERF_C + TCERF_{VC}^j + TCERF_D + TCERF_{VV}^j \quad (Eq. 57)$$

$TCERF^j$ = Tempo de duração total de um ciclo elementar de Carga, entre a frente de desmonte e o nicho, para um determinado instante do projecto, em função do nicho mais próximo.

$TCERF_C$ = Tempo despendidos no movimento de carga do balde, do ciclo elementar de Carga, na frente de desmonte.

$TCERF_D$ = Tempo despendido no movimento de descarga para a caixa da unidade de transporte, do ciclo elementar de Carga.

$TCERF_{VC}^j$ = Tempo despendido na viagem, com o balde carregado, entre a frente de desmonte e o nicho, para um determinado instante do projecto, dentro do respectivo nicho.

$TCERF_{VC}^j$ = Tempo despendido na viagem, com o balde vazio, entre a frente de desmonte e o nicho, para um determinado instante do projecto, em função do respectivo nicho.

Como observado par a actividade de transporte, o estudo do tempo de duração dos movimentos “Viagem Carregado” e “Viagem Vazio”, tal como de todo o ciclo elementar de Carga para o Nicho, deverão ser estudos ao nível da sua média, dentro de cada Nicho. Primeiramente, determinamos o tempo total despendido na carga do escombros para o nicho, dentro de um nicho específico, contabilizando todos os ciclos de trabalho, em que o material é armazenado nesse determinado nicho, através da Equação 58.

$$TRF^{Nicho} = \frac{CT_{Nicho} \times NCERF}{NE_{Rem}} \times [TCERF_C + TCERF_D] + TCERF_{VV}^{Nicho} + TCEF_{VC}^{Nicho} \quad (\text{Eq. 58})$$

TRF^{Nicho} = Tempo total despendido, para um único nicho, na Carga do material desmontado da frente de desmonte.

$NCERF$ = Número de ciclos elementares, por ciclo de trabalho, necessários para remover todo o material desmontado da frente de desmonte.

NE_{Rem} = Número de equipamentos de carga afectos à carga do material.

$TCERF_{VV}^{Nicho}$ = Tempo médio, de todos os ciclos de trabalho de um único nicho, despendido no movimento de viagem vazio, do equipamento de carga.

$TCEF_{VC}^{Nicho}$ = Tempo médio, de todos os ciclos de trabalho de um único nicho, despendido no movimento de viagem carregado, do equipamento de carga.

Tendo-se conhecimento do número de ciclos de trabalho referente a cada nicho, poderemos determinar o tempo despendido na carga do material desmontado da frente para o nicho, utilizando a Equação 59.

$$TRF^{médio} = \frac{TRF^{Nicho}}{CT_{Nicho}} \quad (Eq. 59)$$

$TRF^{médio}$ = Tempo médio despendido na actividade de Carga do material desmontado entre a frente e os nichos, durante todo o projecto.

A determinação temporal da actividade será realizada apenas para um determinado nicho, tal como observável, contudo não é descabido assumir os resultados para qualquer um dos nichos do túnel, pois tal com referido é assumido que os nichos apresentam a mesma distância entre si, logo entre cada nicho será realizado o mesmo número de cilho de trabalho. Por seguinte, podemos admitir que a média do tempo de Carga, determinada para um nicho, é semelhante para todos os nichos.

6.2.2.1.1 Operação de Limpeza do Nicho

Actividade de Carga do Escombro do Nicho

A quando o estudo desta operação, foi compreensível a sua similaridade com a Operação de Remoção do material desmontado da Frente, directamente para a escombreira. O conhecimento destas semelhanças apresenta-se como uma “arma” bastante útil no estudo e temporização da operação. Dentro desta operação, encontraremos a actividade de carga, que irá remover o material desmontado do nicho para a caixa das unidades de transporte, sendo que os movimentos do ciclo elementar dos equipamentos de carga são semelhantes aos da actividade de Carga “padrão”, constituídos pelos movimentos de Carga, Descarga, Viagem Vazio e Viagem Carregado. No caso desta actividade, a duração de cada um dos movimentos poderá ser determinado empiricamente, pois, principalmente nos movimentos de viagem, não haverá o problema das distâncias percorridas. Desta forma, podemos determinar o tempo da actividade de Carga do material rochoso do nicho, através Equação 60.

$$TRN = \frac{NCER}{NE_{rem}} \times TCERN_C + TCERN_{VC} + TCERN_D + TCERN_{VV} \quad (Eq. 60)$$

TRN = Tempo despendido na actividade de Carga do material desmontado do nicho para a caixa das unidades de transporte.

$NCERN$ = Número de ciclos elementares de carga, por ciclo de trabalho, necessário para remover o material desmontado do nicho para a caixa do equipamento de transporte.

NE_{rem} = Número de equipamentos de carga, que realizam a actividade de remoção do material desmontado do nicho.

$TCERN_C$ = Tempo despendidos no movimento de carga do balde, do ciclo elementar de carga.

$TCERN_D$ = Tempo despendido no movimento de descarga para a caixa da unidade de transporte, do ciclo elementar de carga.

$TCERN_{VC}$ = Tempo despendido na viagem, com o balde carregado, entre o nicho e o equipamento de transporte.

$TCERN_{VV}$ = Tempo despendido na viagem, com o balde vazio, entre o nicho e o equipamento de transporte.

Actividade De Transporte do Material Desmontado do Nicho para a Escombreira

Quanto à actividade de transporte, constituinte desta operação, deparamo-nos novamente com o problema do constante crescimento das distâncias a percorrer pelas unidades de transporte. Contudo algumas diferenças ocorrem, que apresentam um papel importantíssimo. Primeiramente, observado a metodologia de carga, quando utilizado o Nicho, podemos entender que a unidade de transporte apenas realizará o seu movimento até aos nicho a ser utilizado, em determinado ciclo de trabalho, isto é, não acompanhara constantemente o afastamento da frente do túnel. Esta constatação impossibilita-nos de aplicar a expressão matemática criada anteriormente. Compreendida esta situação diferenciadora das duas actividades, podemos iniciar o estudo desta actividade.

Primeiramente, tal como efectuado para as outras actividades, o conhecimento do ciclo elementar é essencial. A sua apresentação minuciosa não será necessária, pois os movimentos serão semelhantes: Carga, Viagem Carregado, Descarga e Viagem Vazio. Quanto aos movimentos Carga e Descarga, a sua temporização será baseada em dados empíricos, enquanto os movimentos Viagem Carregado e Viagem Vazo serão temporizados baseado em expressões matemáticas mais complexas.

Realizando o procedimento, como já efectuado anteriormente, inicialmente devermos relacionar o avanço constante do túnel com o crescimento das distâncias a ser percorridas pelos equipamentos de transporte. Como nesta actividade, estes apenas se deslocam para até aos nichos, o número destas estruturas terá de ser utilizado como referência e relacionado com um índice, que facilite o estudo, como observado de seguida.

Tabela 26 – Relação entre o número de Nichos, ao longo de todo o túnel e o índice k

Valor Índice k	Número de Nichos (NN)
0	1
1	2
\vdots	\vdots
$NN - 1$	(NN)

Tornasse importante referir, que nesta organização da Remoção do material desmontado, a boca do túnel é assumida como sendo o primeiro nicho do túnel. Por outras palavras, inicialmente, a boca do túnel servirá com nicho, sendo que o material desmontado será armazenado temporariamente, junto da boca do túnel, até ser removido e transportado para a escombreira. Sendo assim, a distância a ser percorrida, para um dado nicho, é calculada pela Equação 61.

$$DT_{N-E}^k = DT_{B-E} + (k \times DN) \quad (\text{Eq. 61})$$

DT_{N-E}^k = Distância a ser percorrida, em metros, entre um determinado nicho e a escombreira.

DT_{B-E} = Distância entre a boca do túnel e a escombreira, em metros. Como apresentado, esta distância será constante pra todo o projecto.

k = Índice representativo da evolução dos nichos, em conformidade com o avanço do projecto

DN = Distância entre nichos, em metros.

Conhecidas as distâncias, podemos determinar os tempos despendidos nos movimentos de Viagem Vazio (Eq. 62) e Carregado (Eq. 63), para um ciclo elementar e para um determinado nicho:

- Tempo de Viagem Vazio:

$$TCETN_{VV}^k = \frac{DT_{N-E}^k}{vel_V} = \frac{DT_{B-E} + (NN-1) \times DN}{vel_V} \quad (\text{Eq. 62})$$

$TCETN_{VV}^i$ = Tempo de viagem vazio do equipamento de transporte, entre a escombreira e um nicho específico.

vel_V = Velocidade da unidade de transporte, quando possui a caixa vazia.

- Tempo de Viagem Carregado:

$$TCETN_{VC}^k = \frac{DT_{N-E}^k}{vel_c} = \frac{DT_{B-E} + (NN-1) \times DN}{vel_c} \quad (\text{Eq. 63})$$

$TCETN_{VC}^i$ = Tempo de viagem carregado do equipamento de transporte, entre a escombreira e um nicho específico.

vel_c = Velocidade da unidade de transporte, quando possui a caixa carregada.

A duração temporal, do ciclo elementar de transporte, entre a escombreira e um nicho específico será determinado pela Equação 64.

$$TCET^k = TCETN_C + TCETN_{VC}^k + TCETN_D + TCETN_{VV}^k \quad (\text{Eq. 64})$$

$TCETN_C$ = Tempo despendido no movimento de carga, de ciclo elementar de transporte, na operações de transporte do material desmontado entre um nicho e a escombreira.

$TCETN_D$ = Tempo despendido no movimento de descarga, de ciclo elementar de transporte, na operação de transporte do material desmontado entre um nicho e a escombreira.

Como já há sido dito, o estudo da duração temporal, de uma actividade com estas características, torna-se mais simples e interessante quando é realizado em função da sua média, desta forma, podemos determinar a duração temporal da média da actividade de transporte entre os nichos e a escombreira, para todo o projecto, pelas Equações 65 e 66.

$$TTR^{projecto} = \frac{NN \times CT_{Nicho} \times NCETN}{NE_{trans}} \times [TCETN_C + TCETN_D] + \sum_0^k \frac{DT_{B-E} + (NN-1) \times DN}{vel_c} + \sum_0^k \frac{DT_{B-E} + (NN-1) \times DN}{vel_v} \quad (\text{Eq. 65})$$

$TTR^{projecto}$ = Tempo total despendido na actividade de transporte entre os nichos e a escombreira, durante todo o projecto.

CT_{Nicho} = Ciclos de trabalho realizados correspondentes a um único nicho.

$NCETN$ = Número de ciclos elementares realizados pelas unidades de transporte, dentro de um ciclo de trabalho, de forma a transportar todo o material desmontado do nicho.

$$TTR^{medio} = \frac{TTR^{projecto}}{CT \times NN \times NCETN} \quad (\text{Eq. 66})$$

TTR^{medio} = Tempo médio despendido na actividade de transporte do material desmontado entre os nichos e a escombreira, durante todo o projecto.

Com as expressões anteriores, que como referido, são muito similares as apresentadas a quando o estudo da Operação de Remoção do material desmontado, para projectos em que não são utilizados nichos, temos a possibilidade de determinar o tempo despendido na carga e transporte do material armazenado provisoriamente no nicho.

6.3 DURAÇÃO DE UM CICLO DE TRABALHO

Até a este ponto foram observadas todas as operações constituintes de um ciclo de trabalho, referente a um projecto de escavação de um túnel. Salientando-se como referido anteriormente, a exclusão da actividade de sustimento, por opção. Conhecidas todas as operações, adquire-se a capacidade de determinar o tempo de duração de um determinado ciclo de trabalho no seu todo que, como observado, se pode iniciar na marcação da pega de fogo na frente de desmonte ou na chegada do Jumbo à frente e que termina no instante em que é removido todo o material desmontado, da última pega de fogo, da frente do túnel.

Inicialmente será apresentada a metodologia de determinação da duração temporal de um ciclo de trabalho “comum”, isto é, em que a operação de Remoção do material desmontado não utiliza nichos como locais de armazenamento provisório do material. No final será realizada a abordagem à metodologia de determinação da duração de um ciclo de trabalho, em que os nichos serão utilizados como local de armazenamento provisório do material.

6.3.1 Duração de Um Ciclo de Trabalho Sem a Utilização de Nichos

Para o conhecimento do tempo total despendido num ciclo de trabalho, sem a utilização de nichos como estrutura de apoio à Remoção do material de desmonte, a adição de todas as parcelas temporais, referentes a todas as operações do ciclo, seria a operação mais lógica, todavia esta metodologia seria uma sobrestimação temporal do ciclo de trabalho e consequentemente da duração temporal de todo o projecto. Esta estimação por excesso sucede devido à metodologia não contabilizar a sobreposição de operações que ocorre dentro de um ciclo de trabalho. Pois, apesar de as operações apresentadas anteriormente, seguirem, como estudado, uma sequência de trabalhos com dependência entre si, algumas actividades podem ocorrer em simultâneo, tanto na sua totalidade como parcialmente.

Para se realizar uma estimação correcta do tempo de ciclo de trabalho é essencial o conhecimento das operações que irão influenciar esse tempo, para tal, é utilizada uma metodologia em que as operações do ciclo são divididas entre dois grupos, “Operações influenciadoras do ciclo” e “Operações não influenciadoras do ciclo”, que agruparam as operações que contarão para o cálculo do ciclo de trabalho e as operações que não serão contabilizadas, respectivamente. As operações que pertencerão ao segundo grupo, das que não influenciam o ciclo do trabalho, são aquelas que poderão ser realizadas em simultâneo com outras operações, não devendo o seu tempo contabilizados, de forma a evitar a estimação por excesso, mencionada previamente.

Seguindo este prisma, as operações do ciclo de trabalho, deverão ser agrupadas nos dois grupos, sendo que, determinadas operações poderão pertencer a um grupo para um

determinado projecto, enquanto para outro poderão pertencer ao outro, isto claro, sempre dependendo das características do projecto em causa.

Seguindo a política referida, as primeiras operações, do ciclo de trabalho, a serem alvo de estudo são as operações de Marcação da Pega de Fogo e Chegada do Jumbo. Com estas duas primeiras operações ocorre já a situação anterior, em que categorização da sua influência para a duração efectiva do ciclo de trabalho dependerá das características do projecto. Nesta situação, a característica do projecto que influenciará a classificação das operações, segundo a sua influência para o ciclo, será a característica do Jumbo utilizado na perfuração, nomeadamente se este possui o *software* de marcação da pega de fogo automático. Em função desta característica do Jumbo, poderão ser adoptadas umas das seguintes classificações das operações:

Jumbo de Perfuração possui Software de Marcação automático?

- **“Sim”**: Neste caso a operação de marcação da pega de fogo, como estudado previamente, é inexistente, pois não ocorre a necessidade de ser realizada manualmente pelos operadores. Sendo que a operação de Chegada do Jumbo será a primeira operação a ser contabilizada para o ciclo de trabalho.

Tabela 27 – Classificação das operações quando o Jumbo possui software de marcação automática

Operação	Classificação
Marcação Pega de Fogo	Não influenciadora (Inexistente)
Chegada do Jumbo	Influenciadora

- **“Não”**: No caso de o Jumbo não possuir o software a marcação terá de ser realizada manualmente, existindo a operação de marcação da pega de fogo e a de chegada do Jumbo em simultâneo, sendo que será contabilizado para a duração do ciclo de trabalho, a operação que tiver uma maior duração.

Tabela 28 – Classificação das operações quando o Jumbo não possui software de marcação automática

Operação	Classificação
Marcação Pega de Fogo	Influenciadora Se: $T_M > T_J$
Chegada do Jumbo	Influenciadora Se: $T_M < T_J$

Como podemos observar a resolução desta situação, em que dependendo das características a operação influenciadora poderá variar, é bastante simples, apenas necessitando de uma

análise simples das características do Jumbo e caso necessário da duração das operações. A resolução deste problema é também facilitada pela própria característica das operações, que apresentam durações constantes ao longo de todo o projecto.

A operação seguinte, Perfuração, é uma das actividades principais, como observado, e não pode ser realizada em simultâneo com uma das outras operações estudadas, sendo por isso considerada uma operação influenciadora do ciclo de trabalho.

Terminada a perfuração, precede-se a operação de carregamento da pega de fogo com explosivo, que apenas pode ser realizada quando terminada a operação de perfuração, não podendo ocorrer em simultâneo, fundamentalmente devido a exigências de segurança. Desta forma, tal como a operação de perfuração, a operação de Carregamento é considerada como operação que interfere no ciclo de trabalho.

Tal como a operação anterior, as três seguintes, Ligação, Saída dos Operadores e Disparo e Ventilação, são realizadas em sequência, sendo o início de cada um delas correspondente ao instante após o fim da operação que antecede. Pelo exposto, podemos classificar estas três operações, como operações influenciadoras no ciclo de trabalho e que evidentemente contaram para a contabilização do tempo de duração do ciclo de trabalho.

Seguidamente à operação de Ventilação, será realizada a operação de Saneamento, que terá como objectivo observar as novas zonas desmontadas, assegurando que estas se encontram seguras e estáveis para os operadores e equipamentos, logo, não poderá ser realizada simultaneamente, sendo por isso uma operação influenciadora do ciclo de trabalho.

Após terminada a operação de Saneamento, como observado, é iniciada a operação de Limpeza da Frente, que se divide nas actividades de carga e de transporte. A operação de Limpeza da Frente é outra das operações que influenciará o ciclo de trabalho do projecto, tendo um grande peso no tempo de ciclo. Como visto ao longo do trabalho, o estudo desta operação é sem dúvida facilitado quando estudadas as suas duas actividades separadamente. A actividade de carga e de transporte ocorrem simultaneamente durante o ciclo de trabalho, contudo a classificação destas, segundo a sua influência na duração do ciclo de trabalho, é um pouco mais complexa do que observada para as operações de Marcação e de Chegada do Jumbo.

Primeiramente para compreender estas duas actividades, dentro de um ciclo de trabalho, é importante relembrar o referido anteriormente, acerca das suas grandes interdependências e de que o tempo da actividade de Carga é contabilizado dentro do tempo da actividade de transporte, através do tempo de carregamento, do ciclo elementar dos equipamentos de transporte.

É importante também referir, que para a análise e estudo das suas influências outro pressuposto terá de ser admitido, nomeadamente para a actividade de Transporte. Enquanto a actividade de Carga apresenta uma duração constante durante todo o projecto, a actividade de Transporte não apresenta essa característica, tal como estudado anteriormente. Esta

particularidade da actividade de transporte é um dos grandes dificultadores do estudo da actividade e da sua influência para um ciclo de trabalho e para o projecto, pois devido ao seu sucessivo aumento de duração, a actividade poderá apresentar diferentes características, quando comparada com a actividade de Carga. Como tal, o estudo da actividade de Carga e da sua duração, de forma a caracterizar as diferentes situações da sua influência será realizada em função da sua média temporal ao longo de todo o projecto. Esta metodologia de estudo poderá apresentar algumas desvantagens, nomeadamente quando estudado apenas um ciclo de trabalho, pois, a média da duração da actividade poderá ser bastante diferente da duração da actividade para o determinado ciclo de trabalho, contudo, como veremos mais à frente, para a estimação da duração total de todo o projecto, esta metodologia não será tão desvantajosa, visto estar em causa o estudo de todo o projecto.

Desta forma podemos então estudar as duas situações que um projecto poderá encontrar, dependendo da duração destas duas actividades, e que levará a diferentes processos de determinação da duração do ciclo de trabalho.

- **Tempo Carga > Tempo Transporte**

Na situação em que o tempo da actividade de Carga apresenta uma duração superior ao tempo da actividade de Transporte, em média, todo o tempo desta será contabilizado, pois a actividade de Transporte, ocorrendo simultaneamente, terá tempo suficiente para ser exercida. Contudo ocorre um fenómeno especial, pois pensando nas duas operações, quando o ultimo ciclo elementar de carga ocorrer, terminando assim também a actividade de Carga, terá de ocorrer ainda o último ciclo elementar de transporte, de forma a descarregar na escombreira a última parcela do material rochoso desmontado. Desta forma, é necessário contabilizar esse último ciclo elementar do equipamento de transporte, não devendo ser neste ciclo elementar incluído o tempo de carga, para evitar redundâncias.

Tabela 29 – Classificação das operações quando o tempo de remoção é superior ao tempo de transporte

Operação	Classificação
Carga	Influenciadora
Transporte	Influenciadora em parte

Em concordância, as duas operações serão calculados através da Equação 67.

$$TR + TCET_D + TCET_{VC}^{médio} + TCET_{VV}^{médio} \quad (\text{Eq. 67})$$

- **Tempo Carga < Tempo Transporte**

Estes casos sucedem, quando as viagens são bastante longas, principalmente, devido ao grande afastamento da escombreira em relação à boca do túnel. Para estes casos, devido à grande duração temporal da actividade de Transporte, o tempo de duração da actividade de Carga não é contabilizado na totalidade, sendo apenas assumido para o tempo que interfere para o ciclo de trabalho, o tempo que é exigido para um equipamento de carga encher totalmente a caixa de um equipamento de transporte. Esta contabilização de apenas esta parcela ocorre, porque para o ciclo de transporte se iniciar, isto é, para ocorrer o primeiro ciclo elementar de transporte, o equipamento de transporte terá de ser carregado pelos equipamentos de carga, logo este processo inicial terá de ser contabilizado. A forma mais simples de introduzir esse tempo de enchimento da caixa da unidade de transporte é adicionando o tempo do movimento Carga, do ciclo elementar de transporte.

Tabela 30 – Classificação das operações quando o tempo de remoção é inferior ao tempo de transporte

Operação	Classificação
Carga	Influenciadora em parte
Transporte	Influenciadora

Para este caso as duas actividades serão contabilizadas utilizando a Equação 68.

$$TCET_c + TT^{medio} = (TCER \times NCER_{Trans}) + TT^{medio} \quad (\text{Eq. 68})$$

Estudadas as diferentes situações ao nível das operações do ciclo de trabalho, principalmente daquelas operações que poderão interferir ou não interferir para o tempo de duração do ciclo de trabalho, foram resumidos os diferentes ciclos de trabalho passíveis de serem encontrados, dependendo das características do projecto, na Tabela 31, onde estão marcada com o símbolo ○ as operações que influenciaram o tempo de duração do ciclo de trabalho para determinada caso.

Tabela 31 – Resumo das diferentes combinações das operações de um ciclo de trabalho

Jumbo com software de Marcação?	Sim		Não			
Relação TM - TJ	TM = 0		TM > TJ		TM < TJ	
Relação TR - TT	TR < TT	TR > TT	TR < TT	TR > TT	TR < TT	TR > TT
Caso	1	2	3	4	5	6
Chegada Jumbo	○	○			○	○
Marcação			○	○		
Perfuração	○	○	○	○	○	○
Carregamento	○	○	○	○	○	○
Ligação	○	○	○	○	○	○
Saída e Disparo	○	○	○	○	○	○
Ventilação	○	○	○	○	○	○
Saneamento	○	○	○	○	○	○
Carga	◇	○	◇	○	◇	○
Transporte	○	◇	○	◇	○	◇

No quadro anterior foi possível perceber-se as possíveis combinações de operações que influenciaram o tempo total do ciclo de trabalho. Nos casos em que a o tempo da actividade de Carga é superior ao tempo da actividade de Transporte ou vice-versa, a actividade de menor duração é caracterizada pelo símbolo ◇, que representará que apenas parte do tempo da operação será contabilizado, tal como estudado anteriormente.

Seguindo então o esquematizado na tabela, podemos apresentar a seguintes expressões para determinar o Tempo Total do ciclo de Trabalho, para cada um dos seis casos:

❖ Caso 1:

$$TTC = TJ + TP + TC + TL + TD + TV + TS + TCET_c + TT^{médio}$$

❖ Caso 2:

$$TTC = TJ + TP + TC + TL + TD + TV + TS + TR + (TCET_D + TVET_{VC}^{médio} + TCET_{VV}^{médio})$$

❖ Caso 3:

$$TTC = TM + TP + TC + TL + TD + TV + TS + TCET_c + TT^{médio}$$

❖ Caso 4:

$$TTC = TM + TP + TC + TL + TD + TV + TS + TR + (TCET_D + TVET_{VC}^{médio} + TCET_{VV}^{médio})$$

❖ Caso 5:

$$TTC = TJ + TP + T + TL + TD + TV + TS + TCET_c + TT^{médio}$$

❖ Caso 6:

$$TTC = TJ + TP + TC + TL + TD + TV + TS + TR + (TCET_D + TVET_{VC}^{médio} + TCET_{VV}^{médio})$$

6.3.2 Duração de um Ciclo de Trabalho com a Utilização de Nichos

Como observado anteriormente, a determinação da duração de um ciclo de trabalho em que os nichos não são utilizados na operação de Remoção, para projectos de escavação de túneis, poderá ser realizada segundo diferentes linhas de raciocínio, dependendo das características do projecto, que manipulará directamente a influência ou a não-influência das operações para o ciclo. Tal diversidade de metodologias de determinação sucede, também influenciada pelas características do projecto, para projectos em que os nichos apresentam-se como auxiliares da operação de Remoção, nomeadamente, como locais de armazenamento provisório.

Tal como verificado anteriormente, em que para um ciclo de trabalho “comum” as características do equipamento de perfuração, influenciam directamente as Operações de Marcação da Pega de Fogo e de Chegada do Jumbo, tal situação ocorre para projectos com as características agora estudadas, em função dos nichos. Como observado, dependendo da resposta a pergunta “Jumbo de Perfuração possui Software de Marcação automático?”, a influência das operações para o ciclo pode ser distintas, podendo ocorrer a sobreposição temporal das duas operações ou até mesmo a inexistência da Operação de Marcação. Desta forma, dependendo da resposta a pergunta anterior, as respectivas operações poderão apresentar influências distintas, tal como observado nas Tabela 27 e Tabela 28.

Como compreendido aquando estudo os nichos como estruturas auxiliares na Operação de Remoção do material desmontado a frente, estes poderão ser utilizados de duas formas distintas, dependendo das características do projecto, sobretudo ao nível da utilização de equipamentos de carga extra, que realizem a carga do material armazenado, do nicho para a escombreira, ao mesmo tempo que outros equipamentos realizem a limpeza da frente, removendo o material deste local para o nicho. A utilização de equipamentos extra levará

então a uma organização do ciclo, principalmente da classificação das suas operações, ao nível da sua influência bastante distinta, devendo ser bem compreendida.

Inicialmente, mesmo antes de descortinarmos a influência das diferentes operações no ciclo de trabalho, deveremos descortinar a Operação de Limpeza da do Nicho, visto que esta é constituída por duas actividades, com um elevado grau de dependência entre si. O problema da organização das actividades constituintes desta operação, actividade de Carga do Nicho e de Transporte do Nicho, foi anteriormente debatido, aquando o estudo das actividades de Carga e de Transporte, para projectos cujos nichos não são utilizados. Como verificado, a duração da Operação dependendo da comparação da extensão temporal entre as actividades constituintes, sendo que a informação retirada dessa comparação. Desta forma, realizando a referida comparação, poderemos estar presente as seguinte situação, afectando a duração da Operação de Limpeza do Nicho:

- **Tempo Carga do Nicho > Tempo Transporte do Nicho**

Tabela 32 – Classificação das operações quando o tempo de carga do nicho é superior ao tempo de transporte

Actividade	Classificação
Carga do Nicho	Influenciadora
Transporte do Nicho	Influenciadora em parte

Neste caso, as operações serão contabilizadas segundo a Equação 69.

$$TLN = TRN + TCETN_D + TCETN_{VC}^{médio} + TCET_{VV}^{médio} \quad (\text{Eq. 69})$$

- **Tempo Carga do Nicho < Tempo Transporte do Nicho**

Tabela 33 – Classificação das operações quando o tempo de carga do nicho é inferior ao tempo de transporte

Operação	Classificação
Carga	Influenciadora em parte
Transporte	Influenciadora

Para este caso as actividades serão contabilizadas como apresentado na Equação 70.

$$TLN = TCETN_c + TTN^{médio} = (TCERN \times NCER_{Trans}) + TTN^{médio} \quad (\text{Eq. 70})$$

Compreendia então a metodologia de determinação da duração temporal da Operação de Limpeza do Nicho, poderemos avançar para a organização do ciclo de trabalho, através da classificação, a nível da influência, das operações constituintes. Para facilitar a entendimento, deveremos então colocar a seguinte pergunta “Serão utilizados equipamentos de carga extra?”, sendo que poderemos ter as seguintes respostas:

- **“Não”**

Não sendo utilizados equipamentos de carga extra, aqueles que realizem a limpeza da frente serão os responsáveis pela carga do material armazenado no nicho para os equipamentos de transporte, para que este possa ser transportado para a escombreira.

Como sabida, os nichos permitem que a limpeza da frente ocorra de uma forma mais rápida, para que possam ser iniciadas as seguintes operações. Nesta situação, as operações posteriores, serão realizadas depois de limpa toda a frente, sendo temporalmente sobrepostas a actividade de Carga do material desmontado do nicho. Compreendemos então que a actividade de Carga do material da frente de desmonte será sempre influenciadora do ciclo de trabalho. Ao passo que a actividade de Carga do material do nicho apenas será influenciadora se a sua duração for superior à soma de todas as operações do ciclo de trabalho, designadamente a Operação de Marcação, Chegada do Jumbo, Perfuração, Carregamento, Ligação, Saneamento. Quanto à Operação de Detonação, veremos futuramente, o porquê de ela não ser contabilizada.

Tabela 34 – Classificação das operações quando não são utilizados equipamentos de remoção extra

Operação	Classificação
Limpeza da Frente	Influenciadora
Limpeza do Nicho	Influenciadora Se, $TLN > (TJ \text{ ou } TM) + TP + TC + TL + TV + TS$
	Não-influenciadora Se, $TLN < (TJ \text{ ou } TM) + TP + TC + TL + TV + TS$

- **“Sim”**

Como também entendido, quando debatido a interferência dos nichos da operação de Remoção, a utilização de equipamentos de carga extra permite que as actividades de limpeza, da frente e do nicho, ocorram simultaneamente. Também como percebido, a duração de limpeza do nicho, será sempre dependente da actividade precedente, pois removerá o material movido por esta. Logo, mesmo que a sua duração temporal seja menor, nunca poderá terminar, ao nível do ciclo, primeiramente que a actividade de limpeza da frente. Tal interacção entre as duas operações exige que se realize a sua comparação temporal, pois dependendo da sua duração diferentes metodologias deverão ser aplicadas.

- **Tempo Limpeza da Frente + Outras Operações > Tempo Limpeza do Nicho**

Sendo a Operação de Limpeza da Frente, aquela de maior duração, toda ela será influenciadora do ciclo de trabalho. Enquanto da Operação de Limpeza do Nicho, apenas será contabilizada a carga e transporte do último de volume de material removido da frente para o nicho. De referir, que assumimos que existe uma grande coordenação de operações, isto é, o material que chega ao nicho é removido a uma velocidade aproximadamente similar à velocidade a que sai.

Tabela 35 – Classificação das operações quando são utilizados equipamentos de carga e o tempo de Limpeza da Frente e das outras operações é superior ao tempo de limpeza do nicho

Operação	Classificação
Limpeza da Frente + Outras Operações	Influenciadoras
Limpeza do Nicho	Influenciadora em parte

Neste caso teremos:

$$(TJ \text{ ou } TM) + TP + TC + TL + TV + TS + TLF + TCETN$$

- **Tempo Limpeza da Frente + Outras Operações < Tempo Limpeza do Nicho**

Nesta situação, a duração da Operação de Limpeza do Nicho, será superior à da Operação de Limpeza da Frente, sendo que cobrirá toda a sua realização.

Utilitário de Apoio à Estimação de Parâmetros na Escavação de Túneis

Tabela 36 - Classificação das operações quando são utilizados equipamentos de carga e o tempo de Limpeza da Frente e das outras operações é inferior ao tempo de limpeza do nicho

Operação	Classificação
Limpeza da Frente + Outras Operações	Limpeza da Frente Influenciadora em parte
Limpeza do Nicho	Influenciadora

Neste caso teremos:

$$TCERF + TLN$$

Como referido, é passível de ser observado pelas expressões anteriores, a Operação de Detonação apresenta-se como especial, devido a sua natureza. Como é sabido, nesta operação é realizada a saída dos operadores e equipamentos do túnel, tendo estes de se colocar a uma distância de segurança da frente de desmonte. Como é de imaginar, durante esta operação, não poderão ocorrer operações de nenhum género, logo, a Operação de Detonação será sempre classificada como influenciadora do ciclo de trabalho.

Tal como realizado para a determinação temporal de um ciclo de trabalho, em que os nichos não são utilizados como auxiliares da operação de Remoção, apresentaremos uma tabela resumo (Tabela 37), sobre a influência das diferentes operações.

Observando a Tabela 37, podemos observar três simbologias distintas para classificar as operações. O símbolo ○, represente as actividades influenciadoras na sua totalidade. O símbolo ◇, classifica as operações como influenciadores apenas em parte, sendo que o símbolo □, tem como objectivo caracterizar a distinção que pode ocorrer entre as operações de Chegada do Jumbo e de Marcação, dependendo das características do equipamento.

Utilitário de Apoio à Estimação de Parâmetros na Escavação de Túneis

Tabela 37 – Resumo das diferentes combinações das operações de um ciclo de trabalho quando utilizados nichos

Equip. Extra Carga	Sim			Não		
Relação TLF+Outras - TLN	TLF+Outras < TLN		TLF+Outras > TLN	TLN > Outras		TLN < Outras
Relação TRN - TTN	TRN > TTN	TRN < TTN		TRN > TTN	TRN < TTN	
Caso	1N	2N	3N	4N	5N	6N
Marcação			□ ○			□ ○
Chegada do Jumbo						
Perfuração			○			○
Carregamento			○			○
Ligação			○			○
Detonação	○	○	○	○	○	○
Ventilação			○			○
Saneamento			○			○
Limpeza da Frente	◇	◇	○	○	○	○
Carga do Nicho	○	◇		○	◇	
Transporte do Nicho	◇	○	◇	◇	○	

Tal como realizado anteriormente, baseando-se na tabela resumos, apresentam-se de seguida, as expressões matemáticas de determinação da duração temporal de um ciclo de trabalho, em que o nicho é utilizado como estrutura auxiliar de remoção:

❖ Caso 1N:

$$TTC = TD + TCERF + TCETN_C + TTN^{médio}$$

❖ Caso 2N:

$$TTC = TD + TCERF + TRN + TCETN_D + TCETN_{VC} + TCETN_{VV}$$

❖ Caso 3N:

$$TTC = (TM \text{ ou } TJ) + TP + TC + TL + TD + TV + TS + TLF + TCETN$$

❖ Caso 4N:

$$TTC = TD + TLF + TRN + TLN$$

❖ Caso 5N:

$$TTC = TD + TLF + TCETN_c + TTN^{médio}$$

❖ Caso 6N:

$$TTC = (TM \text{ ou } TJ) + TP + TC + TL + TD + TV + TS + TLF$$

Sendo assim, conhecidas a duração temporal das diferentes operações e a sua influência no ciclo de trabalho, seja o projecto caracterizado pela utilização ou não utilização nichos, dependendo das características do projecto, temos o poder de determinar o tempo total do ciclo de trabalho.

É importante referir, que devido à grande complexidade, já estuda, da operação de transporte, devido ao seu sucessivo crescimento, a utilização do tempo médio da operação torna-se a forma mais simples e viável de estudar o ciclo de trabalho. Com isto em mente, não nos devemos esquecer que o Tempo Total do Ciclo de Trabalho poderá ser considerado nestas circunstâncias como uma média. Este problema, como veremos mais tarde, ao nível do Duração de todo o Projecto, não será significativo.

7. DURAÇÃO DE UM PROJECTO

Como referido ao longo deste trabalho, a escavação de um túnel, independentemente das suas especificações, é a repetição sucessiva de ciclos de trabalho semelhantes, constituídos por diferentes operações. O número de repetições deste ciclo de trabalho é dependente do comprimento do túnel desejado e do avanço provocado por cada desmonte de uma pega de fogo. Para se realizar a estimação temporal de um projecto de escavação de um túnel, graças ao conhecimento da consecutiva repetição de um ciclo de trabalho, deveremos possuir o conhecimento sobre a duração temporal, estimada, do ciclo de trabalho específica do projecto e o número de vezes que este terá de ser repetido, para que o túnel seja concluído.

Como observamos no capítulo anterior, a estimação temporal do ciclo de trabalho é realizada pela adição dos tempos de duração das operações que interferem neste, podendo ser utilizadas umas das 12 fórmulas anteriores, seis para o caso de não se utilizarem nichos e outras seis para essa situação. Quanto ao número de repetições do ciclo de trabalho, durante todo o projecto, é utilizada a Equação 39, já referida anteriormente.

$$CT = \frac{C^{túnel}}{AP} \quad (\text{Eq. 39})$$

CT = Número de ciclos de trabalho a serem realizados para terminar o projecto

$C^{túnel}$ = Comprimento total do túnel, em metros

AP = Avanço previsto, provocado pelo desmonte de uma pega de fogo, em metros

Desta forma, com o apoio das duas expressões matemáticas, podemos realizar uma estimação do tempo de duração teórico de um determinado projecto de escavação de um túnel, utilizando a Equação 71.

$$TTP_{Teórico} = CT \times TTC \quad (\text{Eq. 71})$$

$TTP_{Teórico}$ = Tempo de duração total teórico do projecto de escavação de um túnel, em minutos

O Tempo de Projecto teórico será então uma estimação do tempo despendido entre o instante inicial da primeira operação, do primeiro ciclo de trabalho, podendo ser a Operação de Marcação da Pega ou de Chegada do Jumbo, e o instante final da última operação, do último ciclo de trabalho, neste caso a Operação de Limpeza da Frente, que coincidirá com a conclusão da escavação do túnel.

A estimação do Tempo de Projecto, responderá a várias variáveis, que influenciaram directamente as várias operações do ciclo de trabalho e os seus tempos de duração. Esta resposta a múltiplas variáveis, será extremamente benéfico para as estimações a realizar, pois permitirá a obtenção de múltiplos resultados, que ajudarão a considerar diferentes abordagens do projecto.

Contudo, apesar das vantagens referidas, a estimação temporal apresentará um problema, muitas vezes importante para projectos desta natureza. Esse problema é originado pela não quantificação, nem previsão, dos imprevistos e pausas no ciclo de trabalho, originando perdas de tempo de trabalho, que levarão a discrepâncias entre o tempo de projecto estimado e o tempo de projecto real. De uma forma muito simples, poderá ser referido que o tempo estimado, será uma representação de um projecto quase perfeito, em que em toda a vida deste não ocorrerão imprevistos e pausas no trabalho.

Num projecto de escavação de túneis, em que ciclo de trabalho é similar ao apresentado anteriormente, as principais origens dessas perdas de tempo são:

- Tempos de paragem involuntária, durante as suas actividades, dos equipamentos de carga, transporte e perfuração, principalmente originados por falhas mecânicas
- Falta de sincronismo entre os equipamentos de carga e transporte
- Falta de sincronismo entre os equipamentos de transporte, levando a criação de filas de espera, atrasando a operação
- Falta de sincronismo entre os equipamentos de carga
- Imprevisto na perfuração, levando ao atraso da operação, principalmente devido a problemas geológicos ou do equipamento
- Problemas com os operadores, principalmente acidentes pessoais
- Rendimento dos operadores e equipamentos inferior ao expectável

Uma das metodologias, aplicadas em muitas áreas da ciência, como forma de prevenir uma estimação irreal, devido a estas perdas de tempo, é a utilização do Rendimento. Este “fenómeno” é aplicado nas várias actividades, que constituem as operações do ciclo de trabalho. Quando referida a velocidade de perfuração de um equipamento ou a velocidade de carregamento de explosivo por parte de um operador, é notório que os valores teóricos conhecidos, nunca corresponderão aos valores na realidade, devido a um variado número de factores. O rendimento tem então a função de representar a eficiência da determinada actividade/operação. Com este fenómeno a ocorrer em todas as actividades e operações de um ciclo de trabalho, juntamente com imprevisto e pausas no trabalho, é fácil imaginar que a

sucessiva repetição do ciclo de trabalho, levará, involuntariamente, à sucessiva repetição destes elementos prejudiciais à estimação temporal do projecto, que não deverão ser esquecidos no momento da estimação. Face a este problema, a estimação, pela expressão anteriormente apresentada, deverá ser considerada quando o rendimento apresenta o seu valor máximo, igual a 1 (equivalente a 100%), podendo-se, através da Equação 72, se estimar o tempo de duração de determinado projecto de escavação de um túnel, considerando um determinado rendimento:

$$TTP_{Rend} = \frac{TTP_{Teórico}}{R} \quad (\text{Eq. 72})$$

TTP_{Rend} = Tempo de duração total do Projecto, levando em consideração o rendimento médio de todas as operações, em minutos

R = Rendimento médio do conjunto de todas as operações, em percentagem

Como observado, a expressão anterior, envolvendo o fenómeno de rendimento, fornecerá sempre uma estimação superior ao Tempo de Projecto teórico, todavia em projectos muito especiais, o Tempo de Projecto contabilizando o rendimento poderá ser inferior ao Tempo teórico. Nestes caso, o projecto, para além de ser realizado com um rendimento muito alto, próximo do valor máximo, é constituído por características que permitem diminuir os tempos das operações do ciclo de trabalho. O principal influenciador destes casos é a geologia do maciço rochoso que o túnel irá atravessar. Quando a geologia do maciço rochoso em causa apresenta, na realidade, melhores características geotécnicas, comparativamente com as características geológicas previstas através dos diferentes estudos geotécnicos, é possível a diminuição do tempo das operações, devido, fundamentalmente, à possibilidade de aumento do comprimento da pega de fogo e da velocidade de perfuração da pega de fogo. Desta forma, quando a geologia real é consideravelmente melhor que a geologia esperada e o rendimento das operações e actividades é extremamente alto, o tempo de Projecto real poderá ser inferior ao tempo de Projecto teórico.

Compreendida a influência do rendimento de operações no tempo de um projecto, é ainda importante referir a influência das horas de trabalho efectivas num projecto. Como podemos imaginar, principalmente quando estamos em presença de trabalhos realizados por operadores, estão não o poderão executar durante 24 horas sobre 24 horas, seja por razões biológicas, de saúde e eficiência, como legais, pois nos países desenvolvidos o limite de horas de trabalho por dia, para recursos humanos, é legalizada e regulamentada. Nos países mais desenvolvidos, operadores podem trabalhar, em média, oito horas por dia, correspondente a um terço de um dia (24 horas). Como podemos compreender, se um operador apenas poderá trabalhar durante 8 horas por dia, o tempo de duração estimado para o projecto, baseado em trabalhos de 24 horas sobre 24 horas, nunca poderá representar a realidade, sendo esse tempo estimado aproximadamente um terço do tempo real do projecto. Com este problema em mente, as empresas que desejam concluir projectos em determinados prazos, são

obrigadas a constituir grupos de trabalho, que irão trabalhar por turnos, geralmente 3 turnos de oito horas, durante o projecto. A criação de turnos de trabalho, tem uma grande desvantagem que é a de multiplicação do número de operadores pelo número de turnos, levando também à multiplicação proporcional da folha salarial. Contudo esta desvantagem não leva as empresas a demoverem-se desta solução, pois para além da redução do tempo de projecto, a criação de turnos, que não obriguem a paragens longas, leva a um acréscimo de produtividade e eficiência, visto os trabalhos serem contínuos.

Ao nível dos turnos, como podemos imaginar, um projecto em que apenas existe um turno de trabalho de 8 horas por dia, não apresenta grande interesse, devido ao acréscimo de tempo do projecto.

A utilização de dois turnos de oito horas, por dia de trabalho apresenta-se como uma das soluções mais aplicáveis, pois permite 16 horas de trabalho por dia, o que permite uma boa produtividade e eficiência. Esta metodologia tem também, como grande vantagem, a possibilidade de utilização das oito horas sem trabalho para manutenção e reparação de equipamentos, principalmente quando estes são alvo de trabalho intenso durante a sua actividade, tal como ocorre em projectos de escavação de túneis.

A utilização de três turnos, é também uma metodologia de trabalho muito aplicável, pois quando bem organizada, permite um trabalho em contínuo, sem paragens. Todavia, a utilização de três turnos, ao nível de equipamentos, é bastante desgastante, tendo de toda a manutenção e reparação ser realiza em simultâneo com o ciclo de trabalho. Para situações deste género, é aconselhável que existam equipamentos de reserva para substituir os equipamentos em trabalho, caso ocorra uma avaria, de forma a não parar os trabalhos.

De notar, que muitas das vezes, quando os dias de trabalho são constituídos por um número de turnos, que não complete todo o dia (24 horas), poderão ser aplicadas horas extras, de forma a completar os trabalhos.

Compreendida a possibilidade da divisão de um dia de trabalho em vários turnos e que estes poderão apresentar diferentes durações, é importante, primeiramente compreender os principais factores a levar em conta para a escolha do número de turnos e de horas, para um determinado projecto:

- Exigência dos prazos
- Custos referentes à folha salarial
- Eficiência da manutenção e reparação ode equipamentos
- Existência de equipamentos de substituição
- Duração de um ciclo de trabalho

De todas os factores apresentados, quero salientar a grande importância do último, referente à duração de um ciclo de trabalho. A duração de um ciclo de trabalho deverá ser sempre levada em conta para a selecção da duração e número de turnos, a serem praticados num dia de trabalho. Vários autores aconselham que a duração de um turno de trabalho, deverá ser

suficientemente longo para realizar um determinado e completo número de ciclos de trabalho, isto é, um turno, deverá preferencialmente, possibilitar que seja realizado, no mínimo um ciclo de trabalho completo, não devendo deixá-lo incompleto para o próximo turno de trabalho. Tal abordagem é preferível, pois se durante um ciclo de trabalho, ocorrer a mudança de turnos, poderá existir uma diminuição da eficiência e produtividade, pois os operadores do novo ciclo iniciaram o seu turno a meio de um ciclo. Com isto, não pretendo referir que uma abordagem deste género é a mais eficiente, pois abordagens diferentes, poderão apresentar grandes níveis de eficiência e produtividade, quando organizadas adequadamente.

Sendo a influência dos turnos, número e duração, de um dia de trabalho, tão relevante, permitindo grandes discrepâncias entre o tempo teórico do projecto e o tempo real do projecto, é importante a criação da Equação 73 que traduza este fenómeno, que nos possibilite a sua utilização, mais tarde, no utilitário informático.

$$TTP_{Real} = \frac{TTP_{Teórico}}{HT \times NT} \quad (\text{Eq. 73})$$

TTP_{Real} = Tempo de duração total e real do projecto, levando em consideração as condições de trabalho (número de turnos e a sua duração)

HT = Horas de trabalho por turno, em minutos

NT = Número de turnos de trabalho por dia

Baseado no previamente referido podemos também criar a Equação 74 que nos permita determinar, em média, devido ao sucessivo crescimento da actividade de transporte, o número de ciclos de trabalho que serão realizados durante um dia de trabalho:

$$CT_{dia} = \frac{HT \times NT}{TTC} \quad (\text{Eq. 74})$$

TTC = Tempo total de duração de um ciclo de trabalho, em média

A partir desta expressão podemos então perceber quantos ciclos de trabalho são realizados, em média, ao longo de todo o projecto, por dia de trabalho. Sendo que a expressão tem uma utilidade significativa, pois poderá ser uma ferramenta útil na busca de uma eficiência de trabalho superior, principalmente no desejo de que cada dia de trabalho permita a realização de um número certo de ciclos de trabalho, sem que estes sejam interrompidos.

Resumidamente, um projecto mineiro, onde se inclui a escavação de túneis, é a repetição sucessiva de ciclos de trabalho, sendo esta lógica empregue para determinar a duração do Projecto. Contudo, como analisado, o tempo de duração do projecto obtido desta forma pode ser bastante discrepante do verdadeiro tempo de duração do projecto, devido aos fenómenos de rendimento das operações e as características do horário laboral. Como observado, apenas em casos excepcionais, em que o horário laboral cobre todo o dia de trabalho, o rendimento de todas as operações é 100% e que não ocorram nenhuma paragem e interrupção, de qualquer natureza, o tempo estimado pelo simples multiplicação do tempo de um ciclo de trabalho pelo número de ciclos de trabalho necessários para completar o projecto é semelhante ao tempo real do projecto. Porém, como observado isto torna-se impossível, logo é de reter que o tempo estimado para um projecto, poderá não representar a duração real deste, sendo necessária uma análise completa, com uma fulcral focagem no rendimento das operações e nas características do horário laboral, de forma a não realizar, fundamentalmente, sobrestimações do tempo de duração do projecto.

8. UTILITÁRIO INFORMÁTICO

Como referido na introdução desta dissertação, toda a teoria estudada previamente teria como finalidade servir de sólida base para a criação de um utilitário informático de apoio à escavação de túneis, nomeadamente na estimação da sua duração temporal. Porém com o avançar do estudo, facilmente se percebeu que outras estimações, importantes para projectos de escavação de túneis, poderiam ser realizadas, dadas as suas relações com a duração temporal.

Para a construção deste *software*, a abordagem apresentada anteriormente, em que um projecto é dividido num ciclo de trabalho que se repete sucessivamente foi o ponto de partida. O estudo intensivo dos possíveis ciclos de trabalho, de um projecto, e das suas operações constituintes, permitiu, como visualizado, a obtenção de expressões matemáticas que serão a base para a ferramenta informática proposta, sendo por isso um entendimento completo, destas, essencial.

Antes de ser realizada a apresentação do utilitário é fundamental referir os pressupostos para a sua utilização, visto que, logicamente, seria extremamente difícil construir um *software* que englobasse todas as possibilidades e alternativas encontradas em projectos de escavação de túneis. Desta forma, para o *software* em causa, é importante referir os seguintes pressupostos:

- Escavação de túneis pelo método Perfuração de Detonação (*Drill and Blast*).
- Escavação do túnel ocorre por secção plena e com o uso de uma caldeira por furos paralelos.
- Exclusão da Operação de Sustimento, como influenciadora do Ciclo de trabalho.
- O utilitário informático assume que todas as escolhas realizadas pelo utilizador não serão alteradas durante o projecto.
- Pá-carregadora é o único equipamento de carga passível de ser utilizado.
- Camião é o único equipamento de transporte admitido.
- As metodologias de carregamento passíveis de serem utilizadas são: Canas pré-preparadas, explosivos a granel com booster, explosivo a granel com explosivo em cartucho como carga de fundo e explosivo cartucho a cartucho.
- O *software* apenas permite a escolha entre detonadores eléctricos e não eléctricos, excluindo-se detonadores electrónicos.

Conhecidas então os principais pressupostos e condições para a utilização do *software*, o início do estudo deste e dos seus componentes pode ser iniciado. O *software* foi desenvolvido na plataforma MATLAB. O utilitário informático apresentado será, como de forma geral acontece com outros *softwares*, dividido em três grandes grupos:

- *Inputs* ou valores de entrada, que são as variáveis iniciais do programa, estas podem ser alteradas pelos utilizadores, de forma a caracterizar o projecto como desejar.
- *Outputs* ou valores de saída, que representam os resultados obtidos para o determinado projecto, fundamentalmente os tempos estimados.
- Processo, que consiste nos processos que utilizam os valores de entrada para determinar os valores de saída, baseando-se principalmente nas expressões matemáticas representadas anteriormente.

Os três grupos constituintes da ferramenta informática, serão apresentados de seguida, focando principalmente a sua função e a sua ligação com o estudo teórico realizado e apresentado anteriormente. Após o término do estudo de todos os constituintes do *software* serão apresentados exemplos da sua utilização, com o objectivo de demonstrar a sua utilização

De referir que a principal unidade temporal utilizada serão os minutos, sendo que se necessário poderão existir algumas alterações, de forma a facilitar a compreensão. Quanto as distancias e comprimentos, o metro será a unidade mais utilizada, sendo o metro por minuto, a medida mais utilizada para representar a velocidade.

8.1 INPUTS

Como referido anteriormente, os *inputs* ou valores de entrada, são o grupo de variáveis que podem ser alteradas pelo utilizador, de forma a aproximar as características do projecto virtual as características desejadas. Alguns *inputs* são impostos pelo cliente, outros, como a geologia, não são alteráveis, só se mudando de local de construção do projecto, sendo que outros são facilmente alteráveis pelo utilizador, ao nível do projecto. Os valores de entrada estão divididos em 6 grupos, que agrupam as variáveis de entrada pelas suas características ou natureza, sendo esses grupos os seguintes:

➤ **Características Gerais**

Grupo de *inputs* principalmente representativos das características do túnel, como as suas dimensões. De forma geral, estes *inputs* são aqueles impostos pelo cliente.

- ❖ **Comprimento do Túnel** (metros)
- ❖ **Área de Secção** (metros quadrados):
- ❖ **Largura** (metros)
- ❖ **Altura** (metros)
- ❖ **Distância Boca do Túnel-Escombreira** (metros)
- ❖ **Diâmetro Furo Carregado** (milímetros)
- ❖ **Comprimento da Pega** (metros)

➤ **Geologia**

A partir destes valores de entrada é introduzida a informação sobre o maciço rochoso no software. Este grupo de *inputs* é aquele, que para um projecto, não poderá ser alterado, a menos que o projecto mude de localização.

❖ **Empolamento**

❖ **Tramos Túnel - RMR** (metros): Para as classes I, II, III, IV e V.

❖ **Tramos Túnel – Dureza** (metros): Para a dureza “Duro”, “Médio” e Mole”.

➤ **Equipamentos**

Este grupo de *inputs* é dividido em três subgrupos, correspondentes aos equipamentos de perfuração, carga e de transporte. Estes *inputs* são aqueles que o utilizador, quando pretende estimar um projecto, tem maior capacidade de alterar.

❖ **Perfuração**

- **Número de Braços**
- **Potência do Martelo:** Escolha entre 12, 16 e 18 kW
- **Com Software de Marcação:** Escolha entre “Sim” e “Não”
- **Distância de Segurança** (metros)

❖ **Carga**

- **Número de Equipamentos**
- **Capacidade de Carga** (metros cúbicos)

❖ **Transporte**

- ❖ **Número de Equipamentos**
- ❖ **Capacidade de Transporte** (metros cúbicos)
- ❖ **Velocidade Vazio** (quilómetros por hora)
- ❖ **Velocidade Carregado** (quilómetros por hora)

➤ **Explosivos e Detonadores**

Este grupo de *inputs*, fornece ao software, informação sobre a metodologia de carregamento do explosivo e dos detonadores utilizados para a sua ligação. Tal como os equipamentos, estes *inputs*, ao nível do projecto, são mais facilmente alteráveis.

❖ **Metodologia de Carregamento:** Escolha entre “Canas Pré-preparadas”, “Booster com explosivo a granel”, “Cartuchos de fundo com granel” e “Cartuchos 1-a-1”

❖ **Detonadores:** Escolha entre “Eléctricos” e “Não-eléctricos”.

➤ Operadores

Neste grupo de *inputs*, pretendesse fornecer ao software, a informação quanto ao número de operadores que irão realizar as respectivas operações.

- ❖ **Marcação, Carregamento, Ligação**
- ❖ **Saneamento**

➤ Horário Laboral

Este grupo de *inputs* permite alterar as condições de trabalho, isto é como será o horário laboral durante um dia de trabalho.

- ❖ **Turnos por Dia**
- ❖ **Duração do Turno** (horas):

Para a manipulação deste dois *inputs*, algumas regras deverão ser consideradas, sendo que a duração total, isto é, soma de todas as horas, de todos os turnos, de um dia, não deverão ser superiores a 24, pois, caso contrário as horas de trabalho excederiam as horas possíveis de um dia.

➤ Nichos

Neste grupo de valores de entrada, estão organizados os *inputs* necessários, caso o utilizador deseje realizar uma estimação, de um determinado projecto, em que este utiliza nichos como estruturas de apoio à Operação de Remoção do material desmontado a frente. Este grupo é constituído pelos seguintes três *inputs*:

- ❖ **Utilizar Nichos?:** Escolha entre “Sim” e “Não”.
- ❖ **Distância entre Nichos** (metros)
- ❖ **Utilizar Equip. Carga Extra?:** Escolha entre “Sim” e “Não”.

Tal como será observado futuramente, o *software* possui na sua programação valores de entrada necessários para o funcionamento do software e de todos os processos, mas que não podem ser alterados pelo utilizador, conforme o seu desejo. A utilização e obtenção destes valores foram baseadas, principalmente, num documento realizado pelo Engenheiro José Cardoso Guedes, intitulado “Túneis em terreno com bom comportamento mecânico”.

8.2 PROCESSO

Após introduzidos todos os *inputs*, por parte do utilizador, o *software* realiza todos os cálculos, baseados nestas informações, de forma a se obterem os *outputs* ou valores de saída desejados pelo utilizador. A todos estes cálculos realizados, responsáveis pela “transformação” dos *inputs* em *outputs* é designado por processo. O utilitário, quanto aos seus processos poderá ser dividido em cinco partes, em função da finalidade de cada uma dessas partes. Sendo que quatro desses processos são realizados automaticamente pelo *software*, enquanto o último processo apenas é efectuado caso o utilizador assim o deseje.

O primeiro processa a ser realizado pelo *software*, é denominado como o Processo Auxiliar. Este processo tem como missão principal realizar cálculos, para a obtenção de valores importantes para os quatro processos seguinte. Para além da sua principal função, este processo fornece resultados interessantes ao nível da previsão e estimação, para o utilizador, que serão apresentados pelo software como *outputs*.

O principal processo do utilitário informático, Processo Estimação Temporal, é aquele que realizará os cálculos para obter a principal informação a que o *software* se propõe, que é a previsão da duração temporal do projecto. Como será observado seguidamente, este processo é constituído por vários grupos de processos, responsáveis por diferentes partes do seu todo. Esta desagregação do processo principal ocorre para uma melhor organização dos cálculos, ocorrendo fundamentalmente por operações. Agrupando-se os processos por operações, é-se possível um mais fácil entendimento do *software* graças a simplificação do mesmo, pois para determinado processo, apenas serão utilizados os seus *inputs* influenciadores, podendo ser descartados os *inputs* que não interfiram para o determinado processo. De referir que os tempos estimados serão sempre apresentados em minutos, podendo ser convertidos para outra unidade temporal, no final, para uma melhor apresentação.

Para além dos cálculos temporais, que o utilitário irá realizar para a estimação da duração do projecto, também serão determinadas as distâncias percorridas pelos equipamentos de transporte, pois, do ponto de vista do utilizador poderão ser informações importantes para o estudo prévio do projecto. A este processo será designado de Processo Distâncias. A previsão, no Processo Aço Perfuração, do consumo dos aços de perfuração que serão utilizados no projecto, será outro dos processos efectuados pelo *software*, pois tal como as distâncias percorridas pelas unidades, são informações relevantes.

Por fim, para além destes quatro processos realizados automaticamente pelo *software*, é oferecida a possibilidade de prever a evolução do projecto para um determinado dia do projecto, permitindo a avaliação da evolução real do projecto com a previsão teórica. Este último processo, intitulado por Processo Avaliação Projecto, como já dito, apenas é efectuado caso o utilizador o deseje, não sendo realizado automaticamente.

De salientar ainda, que para o funcionamento do *software*, para além dos *inputs* introduzidos pelo utilizador, este possuirá consigo outros valores de entrada na sua programação. Apesar de poderem ser considerados *inputs*, o utilizador não possui poder de escolha sobre eles.

8.2.1 Processo Auxiliar

O processo auxiliar, é o primeiro a ser realizado pelo utilitário, sendo que tem a função de manipular os valores de entrada introduzidos pelo utilizar, com o objectivo de obter *outputs* interessantes para o utilizador e de obter dados importantes para os processos que se seguem, sendo por isto denominado como processo auxiliar.

- **Número de Furos (NF):** O número de furos, se não for introduzido pelo utilizador, será calculado pelo *software*, oferecendo desta forma um valor possível. Utilizará os seguintes *inputs*:
 - ❖ Largura (L)
 - ❖ Altura (A)
 - ❖ Diâmetro do furo (dF)

Sendo utilizada a Equação 6 para o cálculo do número de furos:

$$NF = 30.9 + (L \times A) \times \left(\frac{44}{dF} \right)$$

- **Avanço Previsto (AP):** Neste *software*, o avanço previsto, apresentado sempre em metros, será determinado em função dos tramos constituintes do túnel do seu todo, e das suas respectivas classes RMR. Será Determinado o avanço previsto para cada tramo, sendo seguidamente calculado a média aritmética para todo o túnel.
 - ❖ Comprimento da Pega de Fogo (C^{Pega})
 - ❖ Comprimento Total Túnel (C)
 - ❖ Tramos Túnel – RMR ($C^I; C^{II}; C^{III}; C^{IV}; C^V$): comprimento de cada um dos 5 tramos, referentes a cada uma das classes da classificação RMR
 - ❖ Relação entre a classe RMR e o comprimento de cada tramo do túnel, demonstrado na Tabela 38.

Utilitário de Apoio à Estimação de Parâmetros na Escavação de Túneis

Tabela 38 - Relação entre as Classes de RMR, a percentagem de avanço e as expressões para determinar o avanço em cada tramo

Rock Mass Rating		PA (Percentagem de Avanço)	AP
I - Muito Bom	100 - 81	95 %	$AP^I = 0.95 \times C^{Pega}$
II - Bom	80 - 61	80 %	$AP^{II} = 0.80 \times C^{Pega}$
III - Regular	60 - 41	70 %	$AP^{III} = 0.70 \times C^{Pega}$
IV - Pobre	40 - 21	60 %	$AP^{IV} = 0.60 \times C^{Pega}$
V - Muito Pobre	21 - 0	50 %	$AP^V = 0.50 \times C^{Pega}$

O Avanço previsto, em metros, será então determinado da seguinte forma:

$$AP = \frac{(AP^I \times C^I) + (AP^{II} \times C^{II}) + (AP^{III} \times C^{III}) + (AP^{IV} \times C^{IV}) + (AP^V \times C^V)}{C}$$

- **Velocidade de Perfuração (v_{perf}):** A velocidade de perfuração, como referido, é depende da potência do martelo utilizado e da dureza do maciço rochoso. Ambos os parâmetros são alteráveis pelo utilizador, podendo este escolher a potência do martelo desejada e definir os comprimentos dos tramos referentes a cada dureza. Para a determinação da velocidade média de perfuração, serão utilizados os seguintes *inputs*:
 - ❖ Potência do Martelos (P)
 - ❖ Tramos Túnel – Dureza ($C^{Duro}; C^{Médio}; C^{Mole}$)
 - ❖ Comprimento Total Túnel (C)
 - ❖ Velocidades de perfuração atingidas, em função da Potência do martelo e da dureza, representadas na Tabela 39.

Tabela 39 – Velocidades de perfuração, em função da potência do martelo e da dureza da rocha

Velocidade de Penetração (metros/minuto) $VP_{i,j}$			
Potência, j	Dureza da Rocha, i		
	Mole	Média	Dura
12 kW	2.9	2.3	1.8
16kW	3.9	3.3	2.8
18 kW	4.5	3.9	3.3

Com estas informações, podemos determinar a velocidade média de perfuração, através da seguinte expressão:

$$v_{perf} = \frac{(VP_{Duro,j} \times C^{Duro}) + (VP_{Médio,j} \times C^{Médio}) + (VP_{Mole,j} \times C^{Mole})}{C}$$

- **Número de Ciclos de Trabalho (CT):** O número de ciclos de trabalho, e todo o projecto será determinado, utilizando os seguintes valores de entrada:
 - ❖ Comprimento do Túnel (C)
 - ❖ Avanço Previsto (AP)

Sendo o processo, para calcular o número de ciclos:

$$CT = \frac{C}{AP}$$

- **Comprimento Perfurado por Ciclo (CP^{ciclo}):** Tem o objectivo de determinar o número de metros total perfurado, pelo Jumbo, por ciclo de trabalho, baseando-se nos seguintes *inputs*:
 - ❖ Comprimento da Pega (C^{Pega})
 - ❖ Número de Furos (NF)

O cálculo do comprimento total perfurado, em metros, num ciclo de trabalho, é obtido através:

$$CP^{ciclo} = C^{Pega} \times NF$$

- **Comprimento perfurado em todo o projecto (CP^{proj}):** Deseja determinar o total de metros perfurado em todo o projecto, a partir dos seguintes dados:
 - ❖ Número de Ciclos de Trabalho (CT)
 - ❖ Comprimento perfurado por Ciclo (CP^{ciclo})

Através do seguinte processo, é realizada a determinação do comprimento total, em metros, perfurado no projecto:

$$CP^{proj} = CT \times CP^{ciclo}$$

- **Volume removido por Ciclo (VR^{ciclo}):** Determinar o volume, em metros cúbicos, de material rochoso desmontado/removido por cada ciclo de trabalho, utilizando os seguintes dados:

- ❖ Área da Secção (AS)
- ❖ Empolamento (E)
- ❖ Avanço Previsto (AP)

O volume removido por Ciclo é determinado:

$$VR^{ciclo} = AS \times AP \times E$$

- **Volume Removido no Projecto (VR^{proj}):** Calcular o volume total de material rochoso removido, em metros cúbicos, durante todo o projecto. Baseando-se nos seguintes dados:

- ❖ Volume Removido por Ciclo (VR^{ciclo})
- ❖ Número de Ciclos de Trabalho (CT)

O Volume Removido no Projecto é determinado pelo seguinte processo:

$$VR^{proj} = VR^{ciclo} \times CT$$

- **Número de Nichos (NN):** Se forem utilizados nichos como estruturas de apoio operação de Remoção, será realizada o cálculo do número de nichos a ser construído ao longo do túnel, com o espaçamento desejado pelo utilizador. O cálculo necessitará dos seguintes valores de entrada:

- ❖ Comprimento do Túnel (C)
- ❖ Distância entre nichos (DN)

Utilizando estes *inputs*, o número de nichos será determinado pela seguinte expressão:

$$NN = \frac{C}{DN}$$

8.2.2 Processo Estimação Temporal

8.2.2.1 Tempo Chegada do Jumbo à Frente

Como já referido, na Operação de chegada do Jumbo, pretende-se determinar o tempo que a unidade de perfuração necessitara para se deslocar da sua posição de segurança até a frente livre do túnel, onde será realizada a perfuração. Para a determinação deste tempo serão utilizados os seguintes *inputs*:

- Velocidade do Jumbo (v_{Jumbo}), em metros por minuto: O utilitário assumirá, para qualquer projecto, que a velocidade do Jumbo é de 150 metros por minuto.
- Distância de Segurança (DSJ)

Utilizando estes valores de entrada, o processo para calcular o tempo da Operação Chegada do Jumbo, TJ , será:

$$TJ = \frac{v_{Jumbo}}{DSJ}$$

8.2.2.2 Tempo Marcação da Pega de Fogo

Neste Processo será realizado a determinação do tempo despendido na operação de marcação de Pega. O *software* realizara o cálculo do tempo despendido para a marcação da pega de fogo, caso esta seja realizada manualmente, para todos os projectos, independentemente do projecto, sendo apenas no final do processo, escolhido o tempo a ser admitido, em conformidade com as características do Jumbo de Perfuração.

Para o cálculo do tempo de marcação da pega de Fogo (TM), serão utilizados os seguintes *inputs*:

- Tempo de marcação (T_{marc}^{furo}): como referido, baseado em experiências e informações recolhidas, tempo de marcação de um furo, para todos os projectos, será de um minuto.

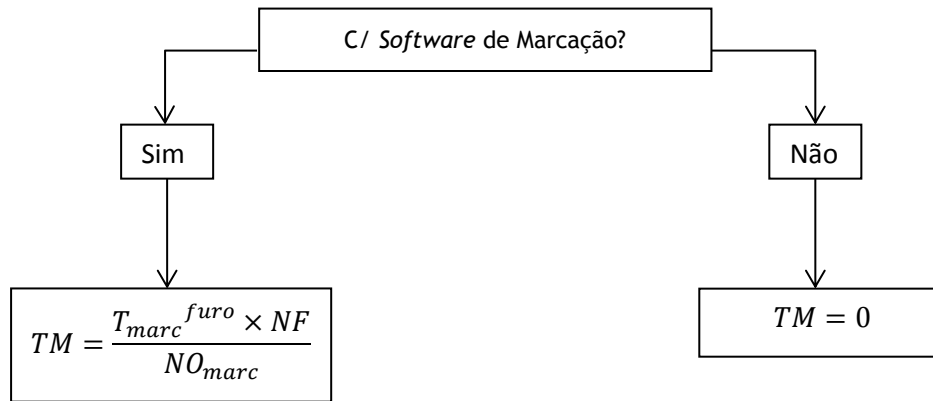
$$T_{marc}^{furo} = 1 \text{ futo/minuto}$$

- Número de Furos (NF)

Sendo o processo:

$$TM = \frac{T_{marc}^{furo} \times NF}{NO_{marc}}$$

Após realizada a determinação do tempo de marcação da pega de fogo, caso está seja realizada pelos operadores, o *software* irá, baseado na escolha realizada pelo utilizador, quanto ao valor do *input* “C/ Software de Marcação”, sobre as características do equipamento de informação, realizar a selecção do tempo de Marcação da Pega de fogo, do projecto em causa:



8.2.2.3 Tempo Perfuração

Como já foi referido, a operação d perfuração é uma das operações mais importantes do ciclo de trabalho, sendo também uma das que mais dependência de variáveis tem.

Para a estimação do tempo de Perfuração, o *software* baseia-se nos seguintes valores de entrada:

- Número de Furos (NF)
- Comprimento da Pega de Fogo (C^{Pega}), em metros
- Dureza do Maciço Rochoso
- Potência do Martelo de Perfuração
- Número de Cabeças de Perfuração (NCP)
- Velocidade de perfuração (v_{perf}): Calculada no Processo Auxiliar.
- Tempo Auxiliar (TA): Os tempos auxiliares, como referido, não dependem das características do maciço rochoso, sendo este valor baseado em dados e informações recolhidas. O tempo auxiliar, assumido pelo software é de 1 (um) minuto por furo.

$$TA = 1 \text{ minuto/furo}$$

Utilizando os inputs referidos, o software realizará o cálculo dos tempos de perfuração e os tempos auxiliares, por ciclo de trabalho, através das seguintes expressões:

Utilitário de Apoio à Estimação de Parâmetros na Escavação de Túneis

Tempo Auxiliar	Tempo Perfuração efectiva
$TP^{aux} = \frac{TA \times NF}{NCP}$	$TP^{efec} = \frac{(v_{perf} \times CP \times NF)}{NCP}$

O Tempo de Perfuração por Ciclo de Trabalho será um somatório dos dois tempos:

$$TP = TP^{efec} + TP^{aux} = \frac{(v_{perf} \times C^{Pega} \times NF)}{NCP} + \frac{TA \times NF}{NCP}$$

8.2.2.4 Tempo Carregamento da Pega de Fogo

Para a estimação do tempo desta operação, o utilitário baseara o seu processo nos seguintes inputs:

- Comprimento da pega de fogo C^{Pega} , em metros
- Número de furos (NF)
- Número de Operadores (NO_{Carreg})
- Velocidade de limpeza ($v_{limpeza}$): O *software* assumirá apenas uma velocidade de limpeza, independentemente do método, sendo a seguinte:

$$v_{limpeza} = 4 \text{ metros/minuto}$$

- Velocidade de carregamento ($v_{carreg,i}$): Dependendo da metodologia de carregamento seleccionada, a velocidade variará, consoante a Tabela 40.

Tabela 40 – Possíveis metodologias de carregamento de explosivo e as suas respectivas velocidades

Metodologia	Velocidade (metros/minuto)
Canas pré-preparadas	5
Booster com explosivo a granel	3,5
Cartuchos com granel	3
Cartuchos 1-a-1	2

- Tempo de tamponamento (T_{tamp}): Tal como a velocidade de limpeza, o *software*, assumirá sempre o mesmo tempo de tamponamento por furo, independentemente das suas características.

$$TC_{tamp}^{furo} = 1 \text{ furo/minuto}$$

O processo de estimação do Tempo de Carregamento (TC), será realizado em três etapas, determinando o tempo de cada uma das suas actividades:

- Primeiro será calculado, em minutos, o tempo da actividade limpeza:

Para um furo	Para toda a Pega
$TC_{limp}^{furo} = \frac{C^{Pega}}{v_{limp}}$	$TC_{limp}^{pega} = NF \times TC_{limp}^{furo}$

- A segunda etapa é a determinação do tempo de duração da actividade de carregamento, também em minutos:

Para um furo	Para toda a Pega
$TC_{carreg}^{furo} = \frac{C^{Pega}}{v_{carreg,i}}$	$TC_{carreg}^{pega} = NF \times TC_{carreg}^{furo}$

- Sendo o tempo da actividade de tamponamento a última etapa, para toda a pega:

$$TC_{tamp}^{pega} = NF \times TC_{tamp}^{furo}$$

- Por fim o tempo da Operação de Carregamento do ciclo, será determinado:

$$TC = \frac{TC_{limp}^{pega} + TC_{carreg}^{pega} + TC_{tamp}^{pega}}{NO_{carreg}}$$

8.2.2.5 Tempo Ligação da Pega de Fogo

Para esta operação, o *software* utilizara os seguintes valores de entrada:

- Número de operadores, que será semelhante ao número de operadores de carregamento (NO_{Carreg})
- Número de furos (NF)
- Número de furos ligados por minuto de ligação (v_{lig}^i): a velocidade de ligação, será em função do número de furos ligados por minuto, sendo que a velocidade empregadas nesta actividade será dependente dos detonadores utilizados para detonação da pega de fogo. O software possuirá a seguinte tabela, com as diferentes velocidades a serem aplicadas:

Tabela 41 – Relação entre o tipo de detonadores utilizados e a sua velocidade de ligação

Detonador (i)	Número de furos ligado por minuto, (v_{lig}^i):
Não-eléctrico	2
Eléctrico	0,5

Desta forma o tempo de Ligação (TL) Será determinado pelo seguinte processo:

$$TL = \frac{NF}{v_{lig}^i \times NO_{Carreg}}$$

8.2.2.6 Tempo Saída dos Operadores e Disparo da Pega de Fogo

Para esta operação de saída do pessoal e disparo será assumido um valor, independentemente das características do projecto, por isso o processo admitido pelo utilitário não necessitará de inputs. Então o tempo da operação ode saída do pessoal e detonação será o seguinte:

$$TD = 20 \text{ minutos}$$

O valor assumido pelo *software* é baseado em informação sobre outros projecto e em conversas com especialistas na matéria, nomeadamente relacionados com a ligação e detonação de pegas de fogo, tal como referido previamente.

8.2.2.7 Tempo Ventilação

Como mencionado na teoria, a operação de ventilação, coincide geralmente com as horas das refeições, partilhando da sua duração, de aproximadamente 1 (uma) hora. Desta forma, independentemente das características do projecto, o tempo de ventilação (TV) por ciclo, será de 60 minutos (um hora):

$$TV = 60 \text{ minutos}$$

8.2.2.8 Tempo Saneamento

Para a estimação da duração desta operação, os valores de entrada, no processo, serão:

- Avanço Previsto (AP), em metros
- Número de Operadores (NO_{san})
- Velocidade de saneamento (v_{san}): A velocidade de saneamento utilizada pelo *software* é baseada em dados de outros projectos, sendo o valor da velocidade de saneamento:

$$v_{san} = 0.04 \text{ metros/minuto}$$

Para a determinação do tempo de saneamento (TS), é utilizada a seguinte expressão:

$$TS = \frac{(AP/v_{san})}{NO_{san}}$$

8.2.2.9 Tempo Carga

No processo de determinação do Tempo de Carga (TR), é constituído por vários passos, que terão de ser cumpridos, para se obter o resultado final e desejado. Primeiramente, os valores de entrada necessários neste processo são:

- Volume Removido por Ciclo de Trabalho (VRC), em metros cúbicos
- Número Equipamentos de carga (NE_{rem})
- Capacidade Volúmica de Carga do equipamento (V_{rem}), em metros cúbicos
- Tempo Ciclo Elementar de Carga: E como referido, durante o estudo desta operação, dos diferentes tempos e duração, dos movimentos do ciclo Elementar:

Tabela 42 – Tempo admitidos para cada um dos movimentos do ciclo elementar de carga, de uma pá carregadora

Tempo Ciclo Elementar de Carga ($TCER_i$)		
Carga ($TCER_C$)	0,4	Minutos
Descarga ($TCER_D$)	0,25	Minutos
Viagem Carregado ($TCER_{VC}$)	0,5	Minutos
Viagem Vazio ($TCER_{VV}$)	0,24	Minutos
Total ($TCER$)	1,14	Minutos

Um dos primeiros cálculos preliminares, dentro do processo de carga, é a determinação do número de ciclos elementares da unidade de carga necessários para remover todo o material desmontado:

$$NCER_{ciclo} = VCR / V_{rem}$$

É importante também conhecer o número de ciclos de trabalho que cada equipamento terá de realizar, para se remover esse mesmo volume desmontado:

$$NCER_{equip} = \frac{VCR}{V_{rem} \times NE_{rem}}$$

Desta forma, o software terá a possibilidade de realizar a estimação temporal desta operação:

$$TR = TCER \times NCER_{equip}$$

8.2.2.10 Tempo Transporte

O tempo da operação de transporte é um dos últimos processos a ser realizados pelo *software*. Para a obtenção deste *output*, são necessários os seguintes valores de entrada:

- Distancia entre a boca do túnel e a escombreira (DT_{E-B}), em metros
- Volume Removido por Ciclo de Trabalho (VRC), em metros cúbicos
- Número Equipamentos de Carga (NE_{trans})
- Capacidade Volúmica de Transporte do equipamento (V_{trans}), em metros cúbicos
- Avanço previsto (AP), em metros
- Números de ciclo de trabalho do projecto (CT)
- Velocidade de deslocação Carregado (vt_{carreg}), será convertida de km/h para m/min
- Velocidade de deslocação Vazio (vt_{vazio}), será convertida de km/h para m/min
- Tempo de descarga do ciclo elementar do equipamento ($TCET_D$): o tempo de duração desta parte do ciclo elementar da unidade de transporte é sempre assumida pelo *software*, que já possui o seguinte valor:

Tabela 43 – Tempo do movimento de descarga, do ciclo elementar de transporte, de um camião

Tempo Ciclo Elementar de Transporte ($TCET_i$)		
Descarga ($TCET_D$)	1	min

Para a determinação do tempo da Operação de Transporte, o processo poderá ser considerado um dos mais complicados, devido a todos os processos preliminares.

Inicialmente o *software* determinara o tempo de carga do ciclo elementar do equipamento de transporte, calculando o número de pás da unidade de carga, isto é, o número de ciclos elementares de carga, necessários para encher a caixa de um camião:

$$NCER_{Trans} = \frac{V_{trans}}{V_{rem}}$$

Sendo o tempo de carga do ciclo elementar da unidade de transporte, em concordância como observado teoricamente:

$$TCET_C = NCER_{Trans} \times TCER$$

Seguidamente deve-se calcular o número de ciclos elementares necessários para transportar todo o material desmonta, tanto na sua totalidade durante um ciclo ($NCET_{ciclo}$), como por unidade de transporte ($NCET_{equip}$):

$$NCET_{ciclo} = \frac{VCR}{V_{trans}}$$

$$NCET_{equip} = \frac{VCR}{V_{trans} \times NE_{trans}}$$

Posteriormente o utilitário realizará a determinação do somatório da distância entre a boca do túnel e a frente de desmonte, para todos os ciclos de trabalho, por outras palavras será conhecida a distância total percorrida por uma unidade de transporte, no percurso entre a boca do túnel e a frente de desmonte, para todo o projecto, sendo esta distancia representante do percurso realizado cheio ou vazio, já que as distancias percorridas são semelhantes. Este valor auxiliar será representado por $DPBF$. Determinado $DPBF$ podemos obter o valor médio ao longo de todo o projecto da distância entre a boca do túnel e a frente de desmonte:

$$DT_{B-F}^{média} = \frac{DPBF}{CT \times NCET}$$

Conhecendo-se as distâncias entre a escombreira e a boca do túnel e a boca do túnel e a frente de desmonte, torna-se possível obter a distância média percorrida por um equipamento de transporte entre a escombreira e a frente do túnel, que é equivalente a distância percorrida por um equipamento durante o seu ciclo elementar, em cada uma das suas duas viagens.

$$DT_{E-F}^{média} = DT_{E-B} + DT_{B-F}^{média}$$

Seguidamente realiza-se a determinação do tempo de viagem carregado e vazio, do ciclo elementar do equipamento, sendo a duração uma média de todo o projecto:

$$TCET_{VV}^{média} = \frac{DT_{E-F}^{média}}{vt_{vazio}}$$

$$TCET_{Vc}^{média} = \frac{DT_{E-F}^{média}}{vt_{carreg}}$$

Estando-se no poder de todos os tempos constituintes do ciclo elementar do equipamento de transporte, podemos calcular a sua duração:

$$TCET^{média} = TCET_C + TCET_D + TCET_{VV}^{média} + TCET_{Vc}^{média}$$

Finalmente, realizados os cálculos preliminares, o *software* determinará o tempo médio da Operação de Transporte, pelo seguinte processo:

$$TT = \frac{NCET_{ciclo} \times TCET^{média}}{NE_{trans}}$$

8.2.2.11 Tempo de Limpeza da Frente

Este processo apenas será realizado se o utilizador desejar utilizar nichos como estruturas de armazenamento temporário do material desmontado. Para este processo serão utilizados os seguintes *inputs*:

- ❖ Distância entre Nichos (DN), em metros
- ❖ Ciclos de trabalho no projecto (CT)
- ❖ Avanço previsto (AP), em metros
- ❖ Volume Removido por Ciclo de Trabalho (VRC), em metros cúbicos
- ❖ Número Equipamentos de Carga (NE_{rem})
- ❖ Capacidade Volúmica de Carga do equipamento (V_{rem}), em metros cúbicos
- ❖ Tempo Ciclo Elementar de Carga, para os movimentos de carga e de descarga:

Tabela 44– Tempo de alguns movimentos ciclo elementar de carga da frente

Tempo Ciclo Elementar de Carga da Frente ($TCER_i$)		
Carga ($TCERF_C$)	0,4	Minutos
Descarga ($TCERF_D$)	0,25	Minutos

- ❖ Velocidade de deslocação do equipamento de carga. Enquanto para os equipamentos de transporte, o utilizador poderá manipular a velocidade como desejar, para estes equipamentos, o *software*, não permitira, utilizando para qualquer processo os seguintes valores de velocidade:

Tabela 45 – Velocidades de deslocação admitidas para unidades de carga

Velocidade Vazio (vr_{vazio})	600 m/min
Velocidade Carregado (vr_{carreg})	300 m/min

Inicialmente serão realizados alguns cálculos auxiliares, sendo que parte é semelhante aqueles realizados anteriormente, para a determinação da duração da actividade de Carga:

- Número de ciclos elementares necessários para remover todo o material da frente de desmonte:

$$NCERF_{ciclo} = \frac{VCR}{V_{rem}}$$

Quanto aos novos processos, inicialmente será calculado o número de ciclos de trabalho realizados em relação a cada nicho:

$$CT_{Nicho} = \frac{CT}{NN}$$

Com esta informação o software poderá determinar a distância total percorrida, por um único equipamento de carga, para este realizar a carga de todo o material da frente para o nicho, em todos os ciclos de trabalho referentes a um único nicho, contudo, apenas contabilizando uma viagem, seja carregado ou vazio. Conhecido este somatório de todas as distâncias percorridas, podemos determinar a média percorrida pelo equipamento de carga, numa viagem, através da seguinte expressão:

$$DPNF_{média} = \frac{DPNF}{CT_{Nicho} \times NCERF_{ciclo}}$$

De seguida podemos determinar, a duração média de um ciclo elementar de carga do material desmontado da frente. Inicialmente determinando-se o tempo médio das viagens:

- Viagem Vazio:

$$TCERF_{VV}^{média} = \frac{DPNF_{média}}{vr_{vazio}}$$

- Viagem Carregado:

$$TCERF_{VC}^{média} = \frac{DPNF_{média}}{vr_{carreg}}$$

- Duração média de um ciclo elementar de carga da frente:

$$TCERF^{média} = TCERF_C + TCERF_D + TCERF_{VV}^{média} + TCERF_{VC}^{média}$$

Podemos então determinar o tempo médio de duração da Actividade de Limpeza da Frente:

$$TLF = \frac{NCERF_{ciclo} \times TCERF^{média}}{NE_{Rem}}$$

8.2.2.12 Tempo de Limpeza do Nicho

Como estudado, esta actividade é constituída pela actividade de Carga do nicho e pela actividade de Transporte do nicho, para a escombreira. Com isto, o processo para determinar da duração desta actividade será dividido em duas partes, de forma a facilitar a sua compreensão e execução.

8.2.2.12.1 Tempo de Carga do Nicho

Este processo será totalmente similar ao apresentado para a determinação do tempo da actividade de Carga, quando não são utilizados Nichos. Dessa forma, será apenas referido os valores temporais de cada um dos movimentos do ciclo elementar de carga e a expressão final, para determinar a duração da actividade. Em caso de dúvidas, aconselha-se a consulta do capítulo 8.2.2.9.

Tabela 46 – Tempo dos movimentos do ciclo elementar de carga do nicho

Tempo Ciclo Elementar de Carga do Nicho ($TCERN_i$)		
Carga ($TCERN_C$)	0,4	Minutos
Descarga ($TCERN_D$)	0,25	Minutos
Viagem Carregado ($TCERN_{VC}$)	0,5	Minutos
Viagem Vazio ($TCERN_{VV}$)	0,24	Minutos
Total ($TCERN$)	1,14	Minutos

$$TRN = TCERN \times NCER_{equip}$$

8.2.2.12.2 Tempo de Transporte do Nicho

Esta actividade apresenta algumas semelhanças com a actividade de Transporte, estudada, quando o projecto não utiliza nichos. Ao contrário da actividade padrão, neste caso as unidades de transporte apenas se deslocam até aos nichos, não acompanhando o sucessivo avanço do túnel. Esta grande diferença, origina uma grande diferença ao nível das distâncias percorridas, e consequentemente da duração do ciclo elementar de transporte, logo será importante a estruturação completa deste processo. Para este processo são necessários os seguintes *inputs*:

- Distancia entre a boca do túnel e a escombreira (DT_{E-B}), em metros
- Volume Removido por Ciclo de Trabalho (VRC), em metros cúbicos
- Número Equipamentos de Carga (NE_{trans})
- Capacidade Volúmica de Transporte do equipamento (V_{trans}), em metros cúbicos
- Números de ciclo de trabalho por Nicho (CT_{Nicho})
- Velocidade de deslocação Carregado (vt_{carreg}), em metros por minuto

- Velocidade de deslocação Vazio (vt_{vazio}), em metros por minuto
- Tempo de descarga do ciclo elementar do equipamento ($TCET_D$): o tempo de duração desta parte do ciclo elementar da unidade de transporte é sempre assumida pelo software, que já possui o seguinte valor:

Tabela 47 – Tempo do movimento de descarga, do ciclo elementar de transporte do nicho

Tempo Ciclo Elementar de Transporte do Nicho ($TCENT_i$)		
Descarga ($TCET_{ND}$)	1	min

Tal como para o processo “Tempo de Transporte” os seguintes cálculos serão realizados:

- Número de ciclos elementares de carga necessários para encher a caixa da unidade de transporte:

$$NCERN_{Trans} = \frac{V_{trans}}{V_{rem}}$$

- Determinação do tempo de duração do movimento de carga, do ciclo elementar de transporte:

$$TCETN_C = NCERN_{Trans} \times TCERN$$

- Número de ciclos elementares de transporte necessários para transportar todo o material, do nicho para a escombreira, tanto na sua totalidade durante um ciclo ($NCET_{ciclo}$), Como por unidade de transporte ($NCET_{equip}$):

$$NCETN_{ciclo} = \frac{VCR}{V_{trans}}$$

$$NCETN_{equip} = \frac{VCR}{V_{trans} \times NE_{trans}}$$

O utilitário com os valores de entrada adicionados e com os resultados dos cálculos preliminares determinará a distância percorrida por uma unidade de transporte, entre a boca do túnel e os nichos, ao longo de todo o projecto, apenas para um dos movimentos de viagem. Com este valor determinado, o utilitário determinará distância média percorrida por viagem, de um ciclo elementar, entre a escombreira e os nichos:

$$DT_{E-N}^{média} = \frac{DPBN}{NN \times CT_{Nicho} \times NCETN} + DT_{E-B}$$

Conhecida a distância média percorrida, podermos determinar a duração dos movimentos “Viagem Vazio” e “Viagem Carregado”, do ciclo elementar:

- Tempo de Viagem Vazio:

$$TCETN_{VV}^{média} = \frac{DT_{E-N}^{média}}{vt_{vazio}}$$

- Tempo de Viagem Carregado:

$$TCETN_{VC}^{média} = \frac{DT_{E-N}^{média}}{vt_{carreg}}$$

O tempo médio de um ciclo elementar de transporte do nicho e o tempo médio da actividade de transporte do nicho serão determinados pelas seguintes expressões:

$$TCETN^{média} = TCETN_c + TCETN_D + TCETN_{VV}^{média} + TCETN_{VC}^{média}$$

Finalmente, realizados os cálculos preliminares, o software determinará o tempo médio da Operação de Transporte, pelo seguinte processo:

$$TTN = \frac{NCETN_{ciclo} \times TCETN^{média}}{NE_{trans}}$$

Conhecidas as durações das duas actividades constituintes da operação de Limpeza da Frente, poderemos, determinar a sua duração através de uma das seguintes expressões:

- Se Tempo Carga do Nicho > Tempo de Transporte do Nicho:

$$TLN = TRN + TCETN_D + TCETN_{VC}^{medio} + TCETN_{VV}^{medio}$$

- Se Tempo Carga do Nicho < Tempo de Transporte do Nicho:

$$TLN = TCETN_c + TTN^{medio}$$

8.2.2.13 Tempo Total Projecto

Realizado o cálculo do tempo de todas as operações, o utilitário informático realizar a determinação do tempo total do projecto. Para tal serão necessários os seguintes *inputs*:

- Tempos das operações, todos em minutos:
 - Chegada do Jumbo (TJ)
 - Marcação da Pega de Fogo (TM)
 - Perfuração (TP)
 - Carregamento (TC)
 - Ligação (TL)
 - Saída do pessoal e Detonação (TD)
 - Ventilação (TV)
 - Saneamento (TS)
 - Transporte (TT)
 - Limpeza da Frente (TLF)
 - Limpeza da Nicho (TLN)
- Número de Ciclo de Trabalho do Projecto (CT)
- Número de Turnos de Trabalho por Dia (NT)
- Horas de Trabalho por Turno (HT)

Com os valores de entrada anteriores, o *software* irá determinar a duração temporal de um ciclo de trabalho completo, dependendo das durações das operações, em minutos, dependendo se o utilizador deseja utilizar nichos e se em caso de utilizar, deseja utilizar equipamentos de carga extra.

Inicialmente para facilitar todo o processo, as diferentes hipóteses, originadas pelas características do equipamento de perfuração, nomeadamente se este possui utilitário de marcação serão resolvidas da seguinte forma:

Caso $TJ > TM$, $T1 = TJ$	Caso $TJ < TM$, $T1 = TM$
----------------------------	----------------------------

❖ **Sem a utilização de Nichos:**

➤ **Caso $TR < TT$**

$$TTC^{min} = T1 + TP + TC + TD + TV + TS + TCET_c + TT^{medio}$$

➤ **Caso $TR > TT$**

$$TTC^{min} = T1 + TP + TC + TD + TV + TS + TR + (T_D + TVT_c^{medio} + TVT_v^{medio})$$

❖ **Com a utilização de Nichos:**

▪ **Não utilizando equipamentos de carga extra:**

➤ **Caso $TLN > Outras\ operações$**

$$TTC = TD + TCERF + TLN$$

➤ **Caso $TLN < Outras\ operações$**

$$TTC = T1 + TP + TC + TL + TD + TV + TS + TLF$$

▪ **Utilizando equipamentos de carga extra:**

➤ **Caso $TLN > TLF + Outras\ operações$**

$$TTC = TD + TCERF + TLN$$

➤ **Caso $TLN < TLF + Outras\ operações$**

$$TTC = T1 + TP + TC + TL + TD + TV + TS + TLF + TCET$$

Determinada a duração do ciclo de trabalho, dependendo das características do projecto, em minutos, será realizada a sua conversão para horas:

$$TTC^{hor} = \frac{TTC^{min}}{60}$$

Conhecido o tempo de um ciclo de trabalho, é realizada a determinação da duração teórica do projecto:

- Em horas: $TTP^{hor} = CT \times TTC$
- Em dias: $TTP^{dias} = \frac{CT \times TTC}{24}$
- Em meses: $TTP^{mes} = \frac{CT \times TTC}{30 \times 24}$

O tempo real de projecto, levando em conta o número de turnos de trabalho, a duração dos turnos e o rendimento, que é assumido sempre como 90%, será por fim calculado:

- Em dias: $TTP_{Real}^{dias} = \left(\frac{TTP^{hor}}{NT \times HT} \right) / 0.9$

- Em meses: $TTP_{Real}^{mes} = \frac{TTP_{Real}^{dias}}{30}$
- Em anos: $TTP_{Real}^{ano} = \frac{TTP_{Real}^{mes}}{12}$

Será também determinado o número de ciclos de trabalho realizado por dia (CT^{dia}), em função do tempo total de ciclo, do número de turnos por dia e da sua duração, pela seguinte expressão:

$$CT^{dia} = \frac{NT \times HT}{TTC^{hor}}$$

8.2.3 Processo Distâncias Percorridas

O utilitário realizará outro processo, fora do âmbito de durações temporais, para determinar as distâncias percorridas pelos equipamentos de transporte. Esta informação como referido é bastante útil para o planeamento de um projecto. Os valores de entrada serão:

- Distância média percorrida pelos equipamentos de transporte, numa viagem, podendo ser para os casos em que se utilizam nichos ou não ($DT_{E-F}^{média}$ ou $DT_{E-N}^{média}$), em metros
- Número de ciclos elementares da unidade de transporte para transportar todo o material desmontado ($NCET_{ciclo}$)
- Número de equipamentos de transporte (NE_{trans})

Com os *inputs* referidos, o software realizara vários processos para obter distancias percorridas segundo diferentes perspectivas:

- Distância média percorrida por ciclo elementar:

$$DT_{CE} = 2 \times (DT_{E-F}^{média} \text{ ou } DT_{E-N}^{média})$$

- Distância média percorrida por ciclo de trabalho:

$$DTT_{CT} = NCET_{ciclo} \times DTT_{CE}$$

- Distância média percorrida por uma unidade de transporte num ciclo de trabalho:

$$DTT_{CT}^{equip} = \frac{DTT_{CE}}{NE_{trans}}$$

- Distância total percorrida em todo o projecto, em quilómetros:

$$DTT = \frac{CT \times DTT_{CT}}{1000}$$

- Distância total percorrida em todo o projecto, por equipamento, em quilómetros:

$$DTT^{equip} = \frac{DTT}{NE_{trans} \times 1000}$$

8.2.4 Processo Aço Perfuração

Outro processo a ser realizado por parte do *software*, será a previsão do consumo de aço de perfuração ao longo de todo o projecto, como já referido. Neste caso serão utilizados os seguintes valores de entrada:

- Comprimento perfurado em todo o projecto (*CPP*)
- Dureza do Maciço Rochoso
- Duração prevista de cada parte do aço de perfuração ($DAP_{i,j}$): a durabilidade de cada peça de aço de perfuração, será em função dos metros perfurados, sendo que o *software* já possui uma média da duração de cada peça, dependendo da dureza do maciço rochoso.

Tabela 48 – Valores de durabilidade admitidos para uma dos instrumentos admitidos como aço de perfuração

Aço de perfuração, <i>i</i>	Dureza do Maciço Rochoso (metros) , <i>j</i>		
	Mole	Média	Dura
Encabadouro	17500	13125	8750
União	15500	11625	7750
Vara	6200	4650	3100
Bit	1520	1140	760
Adaptador para bit	1000	750	500
Bit Alargamento	1000	750	500

A previsão da quantidade de cada peça de aço de perfuração será determinada pelo seguinte processo:

$$QAP^i = \frac{CPP}{DAP_{i,j}}$$

8.2.5 Processo Avaliação Projecto

O último processo a ser realizado pelo utilitário informático, caso o utilizador deseje, será a previsão do projecto, para um determinado dia de trabalho, de forma a realizar uma avaliação do projecto, comparando o estado real deste com a estimação realizada pelo *software*.

Para este processo o utilizador terá de definir o dia de trabalho para o qual deseja conhecer o progresso previsto. Este valor é um *input*, tal como os apresentados anteriormente, contudo, apesar de ser definido pelo utilizador, apenas é apresentado deste processo, pois dele não depende o funcionamento do propósito principal do *software*, que é realizar a previsão da duração temporal de todo o projecto. A este *input* será definido como o dia de trabalho para o qual se dessa realizar a avaliação (*DT*).

Para além do novo *input*, alterável pelo utilizador, o processo utilizará os seguintes valores de entrada:

- Numero e turnos por dia (*NT*)
- Horas de trabalho por turno (*HT*)
- Perfuração realizada por ciclo de trabalho (CP^{ciclo}), em metros
- Volume desmontado por ciclo de trabalho (VR^{ciclo}), em metros
- Avanço previsto por ciclo de trabalho (*AP*), em metros
- Ciclos de trabalho realizado por dia (CT^{dia})
- Duração, em horas, de um ciclo de trabalho (TTC^{hor})
- Número de equipamentos de transporte (NE_{trans})
- Formula DPBF, criada para determina a distância total percorrida entre a boca do túnel e a frente de transporte até um determinado ciclo de trabalho
- Distância entre a escombreira a boca do túnel (DT_{E-B}), em metros
- Número de ciclos elementares dos equipamentos de transporte necessário para remover o material desmontado por ciclo ($NCET^{ciclo}$)

Com os valores de entrada apresentados, serão realizados os seguintes processos para determinar:

- Ciclos de trabalho realizados até ao dia desejado:

$$CT^{DT} = DT \times CT^{dia}$$

- Horas de trabalho realizadas até ao dia desejado:

$$HT^{DT} = TTC^{hor} \times CT^{DT}$$

- Avanço realizado até ao dia desejado:

$$AP^{DT} = CT^{DT} \times AP$$

- Comprimento perfurado até ao dia desejado:

$$CP^{DT} = CT^{DT} \times CP^{ciclo}$$

- Volume desmontado até ao dia desejado:

$$VR^{DT} = CT^{DT} \times VR^{ciclo}$$

- Distancia total percorrida, por todos os equipamentos, até ao dia desejado:

$$DP^{DT} = (2 \times DPBF^{DT}) + (2 \times DT_{E-B} \times CT^{DT} \times NCET_{ciclo})$$

- Distância total percorrida, por equipamento até ao dia desejado:

$$DP_{equip}^{DT} = \frac{DP^{DT}}{NE_{trans}}$$

8.3 OUTPUTS

A partir dos inputs defendidos pelo utilizador e dos valores de entrada presentes no utilitário informático, este realizara os processos estudados previamente de forma a obter os *outputs*, desejados pelo utilizador. A obtenção dos *outputs* é a etapa final do *software*, sendo estes os resultados de todas os processos e operações realizadas pelo software. Dentro dos *outputs* existirão dois grupos, dependendo da informação, sendo os grupos:

- Previsões do Projecto: Aqui serão apresentadas as previsões e estimações mais relevantes para o projecto, sendo estes os *outputs* principais e fulcrais para o projecto. Relacionando os *outputs* com os processos previamente apresentados, neste grupo de *outputs*, serão apresentados os principais resultados obtidos pelos processos Auxiliar, Estimação Temporal. Distância Percorrida e Aço Perfuração.
- Avaliação do Projecto: Neste grupo de *outputs*, será fornecida a previsão sobre o progresso do projecto para um determinado dia de trabalho. Este grupo de *outputs* será o responsável por apresentar a informação do Processo Avaliação Projecto, caso o utilizador o deseje utilizar.

Conhecidos os grupos de *outputs*, cem como os *inputs* do utilitário informático, podemos observar na Figura 61 o *layout* do utilitário proposto, como objectivo nesta dissertação. Utilitário informático designado como *Estimation Tool for Tunneling*.

213

8.4 Exemplos Práticos

8.4.1 Exemplo Prático 1

Imaginemos que existe um concurso, para a construção de um túnel, com o prazo de conclusão de um ano, em que as exigências do cliente e as características do maciço rochoso são as apresentadas na Tabela 49.

Tabela 49 – Características do projecto do exemplo 1

Dimensões do túnel	Características geológicas
2000 metros de comprimento	Factor de empolamento de 1.55
40 metros quadrados de área	Tramo de classe I de 750 metros
5 metros de altura	Tramo de classe II de 1250 metros
8 metros de largura	Tramo de rocha média de 1500 metros
	Tramo de rocha mole de 500 metros

Introduzindo no *software* as exigências do projecto, e alterando os variados inputs podemos observar que será possível realizar o projecto, com o prazo desejado, utilizando as condições observadas na Figura 63.A.

Contudo, imaginemos que o cliente altera o prazo de conclusão do projecto, de 1 ano para 8 meses. Nesta situação, o utilizador, conforme as suas capacidades de trabalho, poderá alterar os diferentes inputs, de forma a conseguir compreender o que necessitará de modificar no projecto, para poder concluir o trabalho no prazo desejado.

Na Figura 62.B, podemos observar uma alteração dos *inputs*, de forma satisfazer a nova exigência do cliente. Com esta nova estimação, onde alterou o comprimento da pega, a potência do martelo, a utilização de um Jumbo com *software* de marcação, a metodologia de carregamento, o tipo de detonadores e o número de operadores que realização a marcação, carregamento e ligação, estimou-se que se seria possível completar o projecto, no novo prazo imposto, em aproximadamente 240 dias.

A visualização do utilitário, com todos os dados e resultados, para os dois casos relatados, poderá ser realizada em anexo, nas Figura 66 e Figura 67.

Utilitário de Apoio à Estimação de Parâmetros na Escavação de Túneis

- Inputs

Características Gerais

Comprimento Túnel (m)	2000
Área de Secção (m²)	40
Altura (m)	5
Largura (m)	8
Dist.	
Escombreira-Boca (m)	400
Diametro Furo (mm)	48
Comprimento Pega (m)	5

Geologia

Empolamento	1.55
Tramos Túnel - RMR	
Classe I 100-81	750
Classe II 81-61	1250
Classe III 61-41	0
Classe IV 41-21	0
Classe IV 21-0	0
Tramos Túnel - Dureza	
Duro	0
Médio	1500
Mole	500

Nichos

Utilizar Nichos?	Não
Distância entre Nichos (m)	0
Utilizar Equip. Remoção Extra?	Não

Equipamentos

Perfuração	
Nº Braços Perfuração	2
Potência Martelo (kW)	16
C/ Software Marcação	Sim
Distância Segurança (m)	500
Remoção	
Nº Equipamentos	1
Capacidade Remoção (m³)	2
Transporte	
Nº Equipamentos	2
Capacidade Transporte (m³)	10
Velocidade Vazio (km/h)	50
Velocidade Carregado (km/h)	25

Explosivos e Detoadores

Metodologias Carregamento	Canas pré-...
Detonadores	Não-electricos

Operadores

Marcação, Carregamento e Ligação	3
Saneamento	3

Horário Laboral

Turnos por Dia	2
Duração do Turno (Horas)	8

Estimar

Figura 62.A – Grupo de *inputs* utilizados para a duração estimada do projecto ser de 8 meses

- Inputs

Características Gerais

Comprimento Túnel (m)	2000
Área de Secção (m²)	40
Altura (m)	5
Largura (m)	8
Dist.	
Escombreira-Boca (m)	400
Diametro Furo (mm)	48
Comprimento Pega (m)	4

Geologia

Empolamento	1.55
Tramos Túnel - RMR	
Classe I 100-81	750
Classe II 81-61	1250
Classe III 61-41	0
Classe IV 41-21	0
Classe IV 21-0	0
Tramos Túnel - Dureza	
Duro	0
Médio	1500
Mole	500

Nichos

Utilizar Nichos?	Não
Distância entre Nichos (m)	0
Utilizar Equip. Remoção Extra?	Não

Equipamentos

Perfuração	
Nº Braços Perfuração	2
Potência Martelo (kW)	12
C/ Software Marcação	Não
Distância Segurança (m)	500
Remoção	
Nº Equipamentos	1
Capacidade Remoção (m³)	2
Transporte	
Nº Equipamentos	2
Capacidade Transporte (m³)	10
Velocidade Vazio (km/h)	50
Velocidade Carregado (km/h)	25

Explosivos e Detoadores

Metodologias Carregamento	Cartuchos ...
Detonadores	Electricos

Operadores

Marcação, Carregamento e Ligação	2
Saneamento	3

Horário Laboral

Turnos por Dia	2
Duração do Turno (Horas)	8

Estimar

Figura 63.B - Grupo de *inputs* utilizados para a duração estimada do projecto ser de 1 ano

Outra das possibilidades do utilitário é caso se deseje realizar a avaliação do estado do projecto. Por exemplo, se estivermos a realizar o projecto referido, e ao fim do primeiro mês (30 dias de trabalho) desejamos saber se o nosso avanço no túnel apresenta-se próximo do avanço estimado. Introduzindo no *software* o dia para o qual se retende fazer a avaliação, neste caso 30, podemos estimar o estado em que o projecto deveria se encontrar. Neste caso, podemos observar na Figura 64 como deveria se encontrar o projecto ao fim de 30 dias de trabalho.

The image shows a vertical software interface titled 'Avaliação Projecto'. It contains several input fields and a button. The 'Dia do Projecto' field is set to 30. Below it is a blue button labeled 'Avaliar'. Further down are several read-only fields displaying calculated values: Ciclos Completos (58.4365), Horas Trabalhadas (480), Avanço Realizado (m) (250.196), Perfuração Realizada (m) (22848.7), Volume Removido (m³) (15512.1), Distância Percorrida (km) (7397.82), and Distância Percorrida por Equip. (km) (3.69891).

Parâmetro	Valor
Dia do Projecto	30
Ciclos Completos	58.4365
Horas Trabalhadas	480
Avanço Realizado (m)	250.196
Perfuração Realizada (m)	22848.7
Volume Removido (m³)	15512.1
Distância Percorrida (km)	7397.82
Distância Percorrida por Equip. (km)	3.69891

Figura 64 – Avaliação do projecto, nas condições do exemplo 1, para o dia 30 de trabalho

8.4.2 Exemplo Prático 2

Observada, no exemplo 1, a estimação passível de ser realizada para projectos que não utilizem nichos como estruturas de apoio para a Operação de Remoção do material desmonta. De seguida iremos exemplificar os resultados obtidos quando são realizadas estimações para projectos em que os nichos são utilizados. Nas podemos observar a estimação para dois projecto com características semelhantes, apenas variando a escolha por parte do utilizador, de utilizar equipamentos de carga extra, de forma à Limpeza do Nicho ocorrer ao mesmo tempo que a Limpeza da Frente. Como podemos observar, através da estimação para a situação em que são utilizados equipamentos extra, como visualizado na Figura 65-A, a estimação do tempo de vida do projecto sofre uma redução de aproximadamente 11 meses, comparativamente com a estimação realizada quando não são utilizados equipamentos de carga extra, observável na Figura 65-B. A percepção antecipada da diminuição do tempo do projecto, através da inclusão de mais um equipamento de carga, poderá ser bastante útil para o utilizador, pois servirá como base de apoio para uma desejada alteração das características do projecto. A apresentação completa do *software*, para ambos os casos poderá ser observada nas Figura 68 e Figura 69, em anexo.

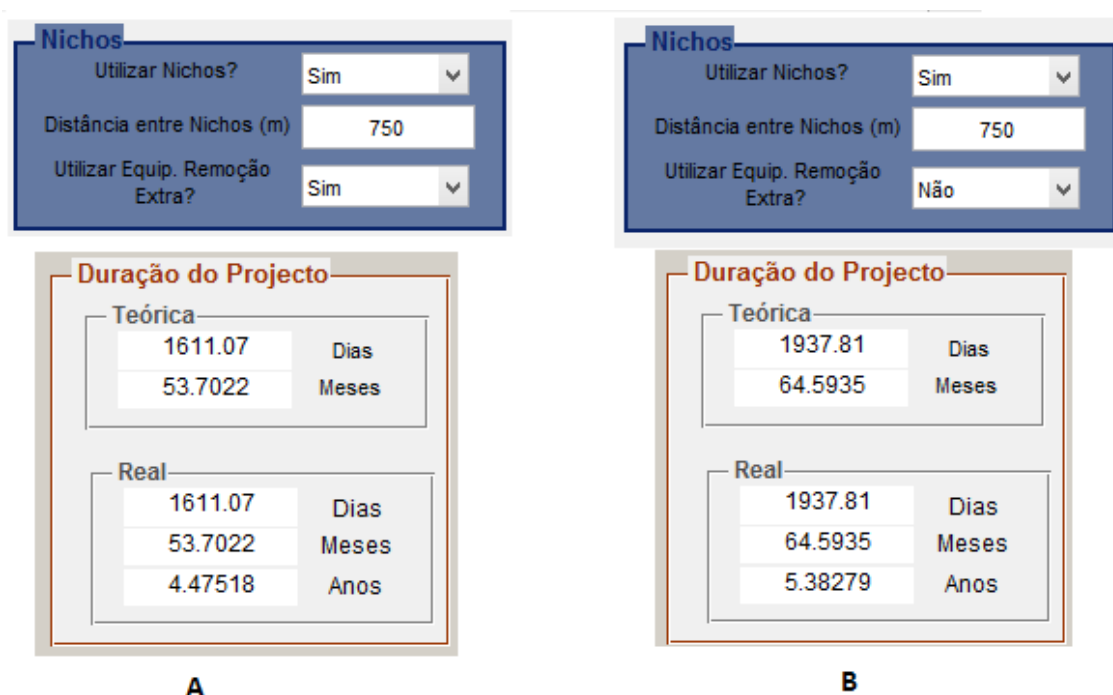


Figura 65 – Apresentação do *input* “Nichos” e do *output* “Duração do Projecto” para os diferentes casos: A- utilizando equipamentos extra e B- não utilizando equipamentos extra

9. CONCLUSÃO E PERSPECTIVAS FUTURAS

9.1 CONCLUSÕES

Observado o utilitário informático, objectivo principal desta dissertação, podemos perceber que a realização de previsões, seja temporais ou outras, para projectos de escavação de túneis apresenta uma complexidade significativa, principalmente devido ao grande número de operações constituintes do ciclo de trabalho, que exigiram, previamente, o seu estudo e compreensão teórica. Este estudo prévio das operações serviu como base estável para a tradução das mesmas para uma linguagem matemática, para que fossem passíveis de serem manipuladas a nível informático, pelo utilitário. A qualidade e precisão do estudo destas operações, como observado, apresenta-se vital para toda a dissertação, e para o *software*, pois um estudo teórico erróneo, retiraria toda a credibilidade do utilitário informático e dos seus resultados estariam postos em causa, pois como já referido, o estudo teórico prévio é a sua grande base de sustentação.

Quanto à informação fornecida pelo utilitário informático, mais dados poderiam ser fornecidos, pois para um projecto de escavação de um túnel, muitos dados e informações necessitam ser obtidos e estudados, como o consumo de explosivos e acessórios, tornando todo o processo complexo e moroso. Contudo, para uma primeira análise, simples e rápida, as previsões e estimações realizadas, pelo utilitário apresentado, oferecem as informações mais relevante para qualquer projecto.

A previsão da duração do projecto é sem dúvida a informação mais relevante, pois é a duração que mais importa para uma empresa que irá realizar a escavação de um túnel, visto que na maioria das vezes lhes será impingido, pelo cliente, um prazo para realizar o projecto. A empresa prestadora do serviço, de forma a perceber quais serão as características do projecto, como o número de equipamento ou operários, que levarão a que a sua conclusão ocorra dentro dos prazos exigidos, poderá utilizar o utilitário proposto, que lhes permitirá realizar estimações temporais consoante o seu desejo. Baseando-se nas diferentes estimações realizadas, com o uso do utilitário, a empresa prestadora do serviço poderá também ter a percepção se possui capacidades e recursos para realizar determinado projecto.

Para além da grande utilidade para as empresas prestadoras do serviço, o utilitário poderá também ser bastante útil para o cliente, pois após receber a informação da empresa, de como esta realizará o projecto pedido, poderá, confirmar se as previsões realizadas pela empresa construtora são reais e atingíveis, prevenindo-se desta forma, de alguma falta de honestidade da empresa prestadora do serviço.

Pelo exposto, é de fácil compreensão que apesar do utilitário informático ser o objectivo final desta dissertação, esta não se restringe apenas à programação informática do mesmo, sendo o estudo teórico do ciclo de trabalho um dos aspectos fulcrais. Como tal podemos referir que a qualidade de uma estimação, exigida de forma a apresentar resultados fiáveis, se baseia no nível de qualidade dos seguintes aspectos: estudo teórico do ciclo de trabalho e operações constituintes, tradução das diferentes operações para uma linguagem matemática e programação informática do utilitário informático. Sendo, que apenas uma qualidade elevada dos três aspectos importa.

9.2 PERSPECTIVAS FUTURAS

Durante a realização desta dissertação, principalmente na construção do utilitário informático, várias novas ideias e melhorias surgiram, contudo muitas delas tornaram-se impossíveis de serem incorporadas, seja por falta de um conhecimento mais alargado na programação informática ou por falta de recursos. Porém, com a perspectiva de uma futura melhoria desta dissertação ou de base de partida para novos trabalhos e dissertações, deixarei seguidamente as principais ideias não realizadas:

- Inclusão de mais equipamentos de carga, passíveis de serem seleccionados para os projectos, como LHD's. Esta melhoria seria bastante importante, pois no *software* apresentado, apenas é possível seleccionar a pá-carregadora como equipamento. Para tal, a temporização dos quatro movimentos do ciclo elementar de carga de diferentes equipamentos, em ambientes de trabalho, seria a solução.
- Obtenção de dados mais fiáveis ao nível das velocidades de carregamento e de ligação dos explosivos, para as várias metodologias, pois como observado, as velocidades presentes no *software* são fiáveis qualitativamente, porém não quantitativamente. Para tal a obtenção desta informação, temporizando estes processos seria uma grande mais-valia.
- Adição de novas metodologias de carregamento, às quatro já existentes.
- Adição de uma metodologia de ligação utilizando detonadores electrónicos, contudo seria importante, que este tipo de detonadores visse a sua utilização para projectos deste género aumentar.
- Realizar a análise dos tramos referentes às diferentes classes de RMR e as diferentes durezas, não só quanto ao seu comprimento, como efectuado neste utilitário, mas também quanto à sua posição no maciço.

- Introdução de variáveis relacionadas com os diferentes bits que poderão ser usados na perfuração, principalmente ao nível das variações que poderão causar na velocidade de perfuração.
- Complementação da Operação de Saída dos Operadores e de Detonação, de forma a torna-las variáveis, conforme determinados parâmetros.
- Obtenção de uma relação entre a qualidade do maciço rochoso e a velocidade de saneamento do túnel.
- Adição da Operação de Sustimento no ciclo de trabalho, relacionando-a com a qualidade do maciço rochoso.
- Adição de parâmetros de caracterização da hidrogeologia e da sua influência no projecto.
- Relacionar todas as previsões e estimações realizadas com preços e custos, permitindo assim realizar previsões monetárias, principalmente, com os ordenados de funcionários, custo dos combustíveis para os equipamentos, etc.

10. BIBLIOGRAFIA

- [1] Atlas Copco. (2008). Mining Methods in Underground Mining.
- [2] Atlas Copco. (2008). Surface drilling.
- [3] Bastos, M. J. N. (1998). A geotecnia na concepção, projecto e execução de túneis em maciços rochosos. Universidade técnica de lisboa – IST.
- [4] Bell, F. G. (2004). Engineering Geology and Construction.
- [5] Brennan, D. (1985). Tunneling operations and equipment proceedings of the session. New York.
- [6] Costa, B. M. A. (2012). Ferramenta informática de apoio à escavação de túneis. Departamento de Minas da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto.
- [7] Felizardo, D. A. (2008). Manual interactivo de ensaios in situ para caracterização de maciços. Departamento de Geociências-UA.
- [8] Fernandes, M. M. (2011). Mecânica dos Solos – Volume II: Introdução à Engenharia Geotécnica. FEUP Edições.
- [9] Guedes, J. C. (1982). Túneis em Terreno com bom comportamento mecânico. Porto.
- [10] Gustafsson, R. (1977). Tecnica Sueca de Voladuras.
- [11] Gustafsson, R. (1981). Blasting Technique.
- [12] Heinio, M. (1999). Rock Excavation Handbook Tamrock.
- [13] Hoek, E. (2006). Pratical Rock Engineering.
- [14] Langefors, U. et al. (1987). The Modern Technique of Rock Blasting.
- [15] López Jimeno, C. et al. (2003). Manual de Perforación y Voladura de Rocas. Madrid.
- [16] Martinho, J. F. (2012). O uso de explosivos na escavação de túneis: implementação do dimensionamento de diagramas de fogo em folha de cálculo. FEUP. Porto.
- [17] Miranda, H. S. (1968). Transporte Mineiros: Efeitos peculiares da disciplina de fecho do relevo. Departamento de Minas da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto.

- [18] Miranda, H. S. (2000). Uma estratégia para dimensionamento preliminar de processos de carga, transporte e armazenamento de sólidos granulares: Vol I. Departamento de Minas da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto.
- [19] Ofoegbu, G. et al. (2008). Bulking factor of rock for underground openings. Alberta, Canadá.
- [20] Pinto, T. A. (2010). Construção e instrumentação dos túneis do Marão. UTAD. Vila Real.
- [21] Salgueiro, J. C. (2011). Túneis-Estado da arte, Projecto e Obra: Análise do projecto de execução e fase de obra do túnel da variante da Trofa, da Linha do Minho. FEUP.
- [22] Silva, V. C. (2009). Curso de MIN210 – Operações Mineiras. DEM-UFOP. Ouro Preto-MG-Brasil.
- [23] Wahlstrom, E. (1973). Tunneling in rock.

ANEXOS

Sistema Q, de Barton: Tabelas de classificação dos diferentes parâmetros

1. RQD

Tabela 50 - Classificação do RQD, segundo o Índice Q, para um maciço rochoso

RQD	Valor	Nota
A. Muito Pobre	0 - 25	1. Quando o valor de RQD é <10 (incluído 0) é assumido o valor 10 para determinar Q 2. Intervalos de valor 5, são suficientemente precisos
B. Pobre	25 - 50	
C. Médio	50 - 75	
D. Bom	75 - 90	
E. Excelente	90 - 100	

2. Grau de alteração ou de preenchimento das descontinuidades

Tabela 51- Classificação do grau de alteração ou de preenchimento das descontinuidades, segundo o Índice Q

“Joint alteration number”	Ja	Ângulo
a) Existe contacto entre as paredes das descontinuidades		
A. Paredes duras, compactas, preenchimento impermeável	0.75	-
B. Paredes não alteradas, somente com leve descoloração	1.0	25 - 35
C. Paredes ligeiramente alteradas, com partículas arenosas e rochas desintegradas não brandas	2.0	25 - 30
D. Paredes com partículas siltosas ou areno-argilosas	3.0	20 - 25
E. Paredes com partículas de materiais moles ou de baixo ângulo de atrito (ex.: talco, caulinite, micas, etc.) e pequenas quantidades de argilas expansivas	4.0	8 - 16
b) Contacto entre as paredes da descontinuidade antes de 10 cm de escorregamento		
F. Paredes com partículas de areia e rochas desintegradas	4.0	25 - 30
G. Preenchimento argiloso sobreconsolidado (contínuo, mas com espessura <5 mm)	6.0	16 - 24
H. Preenchimento argiloso subconsolidado (contínuo, com espessura <5 mm)	8.0	12 - 16
I. Preenchimento argiloso expansivo (ex.: montmorilonite) (contínuo, mas com espessura <5 mm); o valor de Já dependerá da percentagem de partículas de argila expansiva e do acesso de água	8 - 12	6 - 12
c) Não há contacto entre as paredes das descontinuidades		
J. Zonas ou bandas com rochas desintegradas ou esmagadas com argilas (condições do material argiloso semelhantes a G,H e I)	6,8 ou 8 - 12	6 - 24
K. Zonas ou bandas siltosas ou areno-argilosas, com pequena fracção de argila	5.0	-
L. Zonas contínuas de argila (condições do material argiloso similar a G, H e I)	10,13 ou 13 - 20	6 - 24

3. Número de famílias de descontinuidades

Tabela 52- Classificação do número de famílias de descontinuidades, segundo o Índice Q, para um maciço rochoso

“Joint Set Number”	Jn	Nota
A. Nenhuma ou poucas descontinuidades presentes	0.5 - 1.0	1. Para intersecções utilizar $3.0 \times Jn$ 2. Para embocaduras utilizar $2.0 \times Jn$
B. Uma família	2	
C. Uma família mas descontinuidades aleatórias	3	
D. Duas famílias	4	
E. Duas famílias mais descontinuidades aleatórias	6	
F. Três famílias	9	
G. Três famílias mais descontinuidades aleatórias	12	
H. Quatro ou mais famílias, descontinuidades aleatórias, Maciço muito fracturado	15	
I. Rocha esmagada tipo terroso	20	

4. Rugosidade das descontinuidades

Tabela 53- Classificação da rugosidade das descontinuidades, segundo o Índice Q, para um maciço rochoso

“Joint Roughness number”	Jr	Notas
a) Contacto entre as paredes das descontinuidades		1. As características relatadas nas alíneas a) e b) são referentes a amostragens em pequena e médias escala, respectivamente 2. Caso o espaçamento médio entre as descontinuidades da família mais importante for superior a 3 metros, deveser adicionado uma unidade (1.0) 3. O valor de Jr igual a 0.5 poderá ser utilizado em descontinuidades polidas e planas contendo lineações, caso estas lineações estiverem orientadas na direcção de menor resistência
b) Contacto entre as paredes de rocha, antes de 10 centímetros de escorregamento		
A. Juntas Descontínuas	4	
B. Descontinuidades Rugosas, irregulares, onduladas	3	
C. Descontinuidades suaves e onduladas	2	
D. Descontinuidades polidas e onduladas	1.5	
E. Descontinuidades rugosas ou irregulares, planas	1.5	
F. Descontinuidades lisas, planas	1.0	
G. Descontinuidades polidas, planas	0.5	
c) Não há contacto entre as paredes de rocha no escorregamento		
H. Zona contendo minerais argilosos e suficientemente espessa de modo a impedir o contacto entre as paredes	1.0	
I. Zonas esmagadas contendo areias de modo a impedir o contacto entre as paredes	1.0	

5. Estado de tensão

Tabela 54- Classificação do estado de tensão, segundo o Índice Q, para um maciço rochoso

“stress Reduction Factor”		SRF	Notas	
a)	Zonas de fraqueza intersectando as escavações, o que pode causar a descompressão do maciço rochoso durante a abertura destas		<p>1. Aplicar uma redução, entre 25 e 50%, do valor SRF, caso as zonas de corte influenciarem a escavação, sem a atravessarem</p> <p>2. No caso de Maciços com argila, o valor SRF devera corresponder às cargas de descompressão. A resistência da matriz é pouco importante, em maciços muito pouco fracturados e sem argila</p>	
A.	Zonas de fraqueza frequentes, contendo argila o rocha decomposta quimicamente; maciço rochoso envolvente muito descomprimido; a qualquer profundidade	10.0		
B.	Zonas de fraquezas individuais, contendo argila ou rocha decomposta quimicamente; profundidade <=50 fmetros	5.0		
C.	Zonas de fraquezas individuais, contendo argila ou rocha decomposta quimicamente; profundidade >50 metros	2.5		
D.	Numerosas zonas de corte em rocha competente, sem argila; rocha envolvente decomposta; qualquer profundidade	7.5		
E.	Zonas individuais de corte em rocha rígida, sem argila; profundidade <= 50 metros	5.0		
F.	Zonas individuais de corte em rocha rígida, sem argila; profundidade > 50 metros	2.5		
G.	Juntas abertas, rocha muito fracturada e descomprimida; a todas as profundidades	5.0		
b)	Rocha competente, problemas de tensões na rocha		σ_c/σ_1	σ_t/σ_1
H.	Tensões baixas; próximo à superfície	2.5	>200	13
I.	Tensões médias	1.0	200 - 10	13 - 0.66
J.	Tensões altas, estrutura rochosa muito fechada (em norma favorável para a estabilidade, pode ser desfavorável para a estabilidade das paredes)	0.5 - 2.0	10 - 5	0.66 - 0.33
K.	Explosões moderadas de rochas (rocha maciça)	5 - 10	5 - 2.5	0.33 - 0.16
L.	Explosões intensas de rocha (rocha maciça)	10 - 20	<2.5	<0.16
c)	Rocha esmagada, plastificação ode rochas competentes sob a influência de altas pressões de rocha			
M.	Pressão moderada da rocha esmagada	5 - 10		
N.	Pressão elevada da rocha esmagada	10 - 20		
d)	Rochas expansivas, actividade química expansiva devida à presença da água			
O.	Pressões de expansão moderada	5 - 10		
P.	Pressão de expansão elevada	10 - 15		

6. Presença de água

Tabela 55- Classificação da presença de água, segundo o Índice Q, para um maciço rochoso

“Joint Water Reduction”	Jw	Pressão da água (MPa)	Notas
A. Escavações secas ou com pequeno caudal de água, inferior a 5 L/min no local	1.0	<0.1	<p>4. Os valores, nos casos C e F, correspondem a condições naturais, devendo o valor de Jw ser aumentado caso ocorra drenagem</p> <p>5. Não são consideradas condições especiais correlacionadas com a formação de gelo</p>
B. Caudal médio ou caudal, que por vexes, arraste o preenchimento das descontinuidades	0.66	0.1 - 0.25	
C. Caudal ou pressão elevados em rochas competentes sem preenchimento	0.5	0.25 - 1	
D. Caudal ou pressão elevada, com arrastamento significativo do preenchimento das descontinuidades	0.3	0.25 - 1	
E. Caudal excepcionalmente elevado ou pressão explosiva, que decai com o tempo	0.2 - 0.1	>1	
F. Caudal excepcionalmente elevado ou pressão contínua, sem decair com o tempo	0.1 - 0.05	>1	

Exemplo Prático 1

Inputs		Outputs		Avaliação Projecto	
Características Gerais Comprimento Túnel (m) 2000 Área de Secção (m²) 40 Altura (m) 5 Largura (m) 8 Dist. Escavadeira-Boca (m) 400 Diâmetro Furo (mm) 48 Comprimento Pega (m) 4		Equipamentos Nº Braços Perfuração 2 Potência Motor (kW) 12 C/ Software Marcação Não Distância Segurança (m) 500 Remoção Nº Equipamentos 1 Capacidade Remoção (m³) 2 Transporte Nº Equipamentos 2 Capacidade Transporte (m³) 10 Velocidade Vazio (km/h) 50 Velocidade Carregado (km/h) 25		Duração das Operações (min) Marcação 34 Chegada do Jumbo 3.3333 Perfuração 97.8367 Carregamento 125.233 Ligação 68 Saída e Detonação 20 Ventilação 60 Saneamento 28.5437 Remoção 147.594 Transporte 137.742	
Geologia Empolamento 1.55 Tramos Túnel - RMR Classe I 100-81 750 Classe II 81-61 1250 Classe III 61-41 0 Classe IV 41-21 0 Classe V 21-0 0 Tramos Túnel - Dureza Duro 0 Médio 1500 Mole 500		Previsões auxiliares Número de Furos 68 Avanço médio (m) 3.42525 Comprimento Perfurado (m) Por Ciclo 312.8 No Projecto 182675 Volume Removido (m³) Por Ciclo 212.366 No Projecto 124021 Distância Percorrida (Km) Total 34603 Por Equip. Transporte 17301.5		Perfuração Realizada (m) 0 Volume Removido (m³) 0 Distância Percorrida (km) 0	
Explosivos e Detonadores Metodologias Carregamento Cartuchos ... Detonadores Electricos Operadores Marcação, Carregamento e Ligação 2 Saneamento 3		Aço de Perfuração- Quant. Prevista Encabadoiro 35 União 15 Haste 37 Bit 148		Duração do Projecto Teórica 238.154 Dias 7.93848 Meses Real 357.232 Dias 11.9077 Meses 0.99231 Anos	
Horário Laboral Turnos por Dia 2 Duração do Turno (Horas) 8		Ciclo de Trabalho Número de Ciclos No Projecto 584 Por dia 1.63479 Duração de um Ciclo 587.23 Minutos 9.78717 Horas		Distância Percorrida por Equip. (km) 0	
Nichos Utilizar Nichos? Não Distância entre Nichos (m) 0 Utilizar Equip. Remoção Extra? Não		Estimar			

Figura 66 – Software, preenchido com os inputs referentes ao Exemplo Prático 1, para a obtenção de uma duração do projecto de 12 meses

Inputs

Características Gerais

Comprimento Túnel (m)

2000

Área de Secção (m²2)

40

Altura (m)

5

Largura (m)

8

Dist.

400

Escombreira-Boca (m)

48

Comprimento Pega (m)

5

Geologia

Empolamento

1.55

Tramos Túnel - RMR

Classe I 100-81

750

Classe II 81-61

1250

Classe III 61-41

0

Classe IV 41-21

0

Classe V 21-0

0

Equipamentos

Perfuração

2

Nº Braços Perfuração

16

Potência Martelo (kW)

Sim

C/ Software Marcação

500

Distância Segurança (m)

500

Remoção

Nº Equipamentos

1

Capacidade Remoção (m³3)

2

Transporte

Nº Equipamentos

2

Capacidade Transporte (m³3)

10

Velocidade Vazio (km/h)

50

Velocidade Carregado (km/h)

25

Explosivos e Detoadores

Metodologias Carregamento

Canas pré-...

Detonadores

Não-eléctricos

Operadores

Marcação, Carregamento e Ligação

3

Saneamento

3

Horário Laboral

Turnos por Dia

2

Duração do Turno (horas)

8

Estimar

Outputs

Duração das Operações (min)

Marcação

0

Chegada do Jumbo

3.33333

Perfuração

90.6667

Carregamento

81.3167

Ligação

11.3333

Saída e Detonação

20

Ventilação

60

Saneamento

35.6792

Remoção

184.49

Transporte

172.195

Nichos

Limpeza Frente

0

Limpeza Nicho

0

Número Nichos

0

Aço de Perfuração. Quant. Prevista

Encabadoiro

35

União

15

Haste

37

Bt

149

Ciclo de Trabalho

Número de Ciclos No Projecto

468

Por dia

1.94788

Duração de um Ciclo

492.843 Minutos

8.21404 Horas

Duração do Projecto

Teórica

160.174 Dias

5.33913 Meses

Real

240.261 Dias

8.00869 Meses

0.667391 Anos

Previsões auxiliares

Número de Furos

68

Avanço médio (m)

4.2815

Comprimento Perfurado (m)

391

Por Ciclo

182988

No Projecto

182988

Volume Removido (m³3)

Por Ciclo

265.453

No Projecto

124232

Distancia Percorrida (Km)

Total

34672.1

Por Equip. Transporte

17336.1

Avaliação Projecto

Dia do Projecto

30

Avaliar

Ciclos Completos

58.4365

Horas Trabalhadas

480

Avanço Realizado (m)

250.196

Perfuração Realizada (m)

22848.7

Volume Removido (m³3)

15512.1

Distância Percorrida (km)

7397.82

Distância Percorrida por Equip. (km)

3.69891

Figura 67 – Software, preenchido com os inputs referentes ao Exemplo Prático 1, para a obtenção de uma duração do projecto de 8 meses, tal como os resultados da avaliação do projecto para 30 dias de trabalho

Previsões auxiliares	
Número de Furos	77
Avanço médio (m)	4.45003
Comprimento Perfurado (m)	
Por Ciclo	442.75
No Projecto	1.49251e+06
Volume Removido (m³)	
Por Ciclo	333.753
No Projecto	1.12508e+06
Distancia Percorrida (Km)	
Total	434562
Por Equip. Transporte	43456.2

Aço de Perfuração- Quant. Prevista	
Encabadoiro	193
União	181
Haste	452
Bit	1842

Ciclo de Trabalho	
Número de Ciclos	
No Projecto	3371
Por dia	2.0924
Duração de um Ciclo	
688.204	Minutos
11.4701	Horas

Duração das Operações (min)	
Marcação	0
Chegada do Jumbo	3.33333
Perfuração	69.3304
Carregamento	55.2475
Ligação	7.7
Saída e Debonação	20
Ventilação	60
Saneamento	22.2502
Remoção	0
Transporte	0

Nichos	
Limpeza Frente	143.002
Limpeza Nicho	664.776
Número Nichos	20

Duração do Projecto	
Teórica	
1611.07	Dias
53.7022	Meses
Real	
1611.07	Dias
53.7022	Meses
4.47518	Anos

Figura 69 – Estimação para um projecto, em que são utilizados nichos e equipamentos de carga extra